



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

EDGARD PIRES DAMASCENO

***FATORES ASSOCIADOS À DEFLAGRAÇÃO DE
MOVIMENTOS DE MASSA NO MACIÇO DA PEDRA
BRANCA***

MONOGRAFIA

Rio de Janeiro

Março de 2018

EDGARD PIRES DAMASCENO

***FATORES ASSOCIADOS À DEFLAGRAÇÃO DE
MOVIMENTOS DE MASSA NO MACIÇO DA PEDRA
BRANCA***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geologia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Geólogo.

Orientador: Emílio Velloso Barroso
Coorientadora: Raquel Batista Medeiros da
Fonseca

Rio de Janeiro
Março de 2018

CIP - Catalogação na Publicação

D155f Damasceno, Edgard Pires
 FATORES ASSOCIADOS À DEFLAGRAÇÃO DE MOVIMENTOS DE
 MASSA NO MACIÇO DA PEDRA BRANCA / Edgard Pires
 Damasceno. -- Rio de Janeiro, 2018.
 88 f.

 Orientador: Emílio Velloso Barroso.
 Coorientadora: Raquel Batista Medeiros da
 Fonseca .

 Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto
 de Geociências, Bacharel em Geologia, 2018.

 1. Geologia de Engenharia. 2. Movimentos de
 Massa. 3. Maciço da Pedra Branca. 4. Geotecnia. I.
 Velloso Barroso, Emílio, orient. II. Batista
 Medeiros da Fonseca , Raquel, coorient. III. Título.

Edgard Pires Damasceno

***FATORES ASSOCIADOS À DEFLAGRAÇÃO DE MOVIMENTOS DE
MASSA NO MACIÇO DA PEDRA BRANCA***

IMPORTANTE: ESSE É APENAS UM
TEXTO DE EXEMPLO DE FOLHA DE
APROVAÇÃO. VOCÊ DEVERÁ SOLICITAR
UMA FOLHA DE APROVAÇÃO PARA SEU
TRABALHO NA SECRETARIA DO SEU
CURSO (OU DEPARTAMENTO).

Trabalho aprovado. Rio de Janeiro , DATA DA APROVAÇÃO:

Emílio Velloso Barroso
Orientador

Professor
Convidado 1

Professor
Convidado 2

Rio de Janeiro
Março de 2018

Dedico este trabalho primeiramente aos meus pais, por serem essenciais na minha vida e que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida, me guiando e sempre desejando o meu bem. Sem eles este trabalho e os meus sonhos não se realizariam.

Dedico também a toda minha família, que me apoiou e que por diversas vezes se envolveu de forma ativa na produção deste trabalho, pelo amor, carinho e atenção demonstrados gratuita e livremente.

Aos amigos que foram para mim como fontes no deserto, com quem convivi na Engenharia Ambiental, na Geologia e na UFRJ ao longo desses anos. Não fossem eles, em alguns momentos a caminhada teria se tornado pesada e desanimadora demais de se suportar. As experiências de comunhão, piadas, zoeiras e perrengues de toda espécie que vivi com vocês nesses espaços, principalmente no começo da graduação e mais tarde, em campo, formaram as melhores lembranças da minha formação acadêmica. Obrigado por tudo.

Aos meus amigos de vida, que fora da universidade me acompanham desde há muito, que mesmo às vezes estando longe, cultivam comigo amizades que continuam a crescer. Agradeço a Deus sempre pela vida de vocês.

Àquele que é Eterno, Infinito, Incognoscível. Que me dedicou a Sua Vida, dedico também este e todo o meu trabalho.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, prof. Emílio Barroso e a Geóloga Raquel Fonseca, pela orientação, desprendimento e prontidão em ajudar e conduzir cada passo deste trabalho, não só pela amizade e sinceridade demonstradas, mas também pelo acesso aos dados sem os quais este trabalho não seria possível, pelo fornecimento de mapas e pela oportunidade de me receberem como seu aluno de iniciação no LEMETRO, tendo confiança de que eu poderia trazer contribuições e ser parte deste projeto.

Agradeço à Fundação Geo-Rio pela disponibilização dos dados e pela intermediação da Raquel em confiá-los a nós. Espero que este trabalho seja visto como uma proposta de aprimoramento ao serviço de grande valor que a Fundação presta aos habitantes da cidade do Rio de Janeiro.

Ao prof. Luis Paulo Vieira Braga, que nos prestou consultoria inestimável no que tange aos métodos de geoestatística e aos códigos e programas utilizados neste trabalho. Muito obrigado pelo tempo e atenção que teve conosco.

Ao prof. José Carlos Sicoli Seoane, que nos ajudou muito com problemas que vez em quando apareciam no sempre temperamental ArcGis.

Agradeço também a Thayssa de Andrade, minha companheira de mesa e de trabalho, que desenvolveu esta pesquisa desde o começo. Trabalhamos juntos em cada etapa desenvolvida e passamos todas as dificuldades juntos. Muito obrigado por tudo, por ter me ensinado tanto e pelas muitas risadas que demos juntos.

A toda equipe do LEMETRO, que sempre nos auxiliou com sugestões e trabalhou ativamente para nos ajudar. Muito obrigado pelo apoio e pela zoeira interminável, por serem como um a segunda família, sempre trazendo ao ambiente de trabalho uma leveza imprescindível.

*The old pond-
a frog jumps in,
sound of water.
- Basho*

Resumo

A relação entre deslizamentos e chuva é bastante estudada, no entanto ainda existe uma lacuna no conhecimento sobre como os fatores efetivos (variáveis latentes e inerentes às rochas e aos solos juntamente com a influência antrópica) influenciam a deflagração de movimentos de massa para o caso do Maciço da Pedra Branca. A cidade do Rio possui um sistema de alerta de deslizamentos implantado que contempla o fator pluviométrico mas que desconsidera características relevantes que controlam o comportamento mecânico das rochas e solos sob estresse hídrico. Assim este trabalho se propõe a investigar a influência de tais fatores na deflagração de movimentos de massa na área do maciço da Pedra Branca.

Áreas montanhosas são particularmente susceptíveis a movimentos de massa. Dentre todos os domínios montanhosos do município, o maciço da Pedra Branca tem a maior expressão territorial e representa uma fronteira natural para a expansão urbana nas próximas décadas. Devido ao crescimento esperado da população residente dentro de seus limites e ao pouco conhecimento sobre a resposta da área à precipitação, a escolha da área como objeto de estudo é justificada.

Foi feita a triagem de 73 laudos cedidos pela Fundação Geo-RIO e relacionados aos eventos pluviométricos significativos (EPS) entre os anos de 2010 e 2015 para garantir que as ocorrências tivessem a componente pluviométrica associada à deflagração dos movimentos. Um banco de dados foi gerado para fins de tratamento, análise e espacialização das ocorrências, além da verificação e a validação das coordenadas por meio dos programas ArcGis 10.3 e Google Earth. A classificação das tipologias de movimento de massa baseou-se nos registros textuais e fotográficos contidos nos laudos, tomando como base o sistema de classificação de Varnes (1958) acrescido de alguns termos mais gerais quando havia dúvida quanto à tipologia associada a um determinado evento. Os mapas temáticos produzidos permitiram o cruzamento entre os atributos efetivos e a localização das ocorrências, gerando estatísticas preliminares. Em seguida foram feitos cruzamentos entre dois ou mais atributos, gerando estatísticas de correlação. Finalmente foram escolhidas quatro variáveis quantitativas (foram selecionadas aquelas que apresentavam coerência geológica e as que mais contribuíam pra a variância dos dados) para a análise de componentes principais (PCA) de todos os eventos, divididos posteriormente em subgrupos segundo atributos qualitativos. Resultou disso um diagnóstico da dinâmica associativa entre variáveis e sua contribuição individual relativa para cada subgrupo.

Encostas com perfil de curvatura côncavo (75%), áreas residenciais e de favelas (67,7%), litologia de biotita gnaisse ou gnaisse bandado (58,8%) e distância de até 100m de um lineamento (47,1%) foram identificados como os principais fatores potenci-

alizadores de risco para a área de estudo. A maioria dos eventos é de escorregamentos translacionais ($>17,8\%$) que mobilizam pequenos volumes (58%) de solo residual de mais de 2m de espessura ($79,4\%$) e as quedas ($7,4\%$ do total) ocorrem mais em gnaisses (80%). Os eventos de maior porte estão dentro de um raio de 100m do lineamento mais próximo (75%), em favelas ou áreas residenciais (75%) e sobre gnaisses (75%). Os fatores deflagradores são diversos e a relação que mantêm entre si difere de lugar para lugar, justificando esforços continuados de pesquisa na compartimentalização de domínios geológico-geotécnico-geomorfológicos de comportamento similar, visando o aumento da previsibilidade de eventos potencialmente perigosos a nível local.

Abstract

The connection between landslides and rainfall is well studied subject, however little is known about how the effective factors (latent inherent variables of rocks and soils together with human influence over natural environments) in a given area influence the deflagration of mass movements during pluviometric events. The city of Rio de Janeiro has an ongoing warning system that account the rainfall factor, yet disregarding other relevant characteristics that control the mechanical behavior of rocks and soils under hydraulic stress. Therefore, the present work aims to investigate the influence of such effective factors in the deflagration of mass movements in the area of the Pedra Branca massif.

Mountainous areas are particularly susceptible to mass movements. Among all the mountainous areas in the city, the Pedra Branca massif has the greatest territorial expression, representing a natural frontier for urban expansion in the coming decades. Due to the expected populational growth within its borders and the yet lacking of knowledge about how susceptible the area is to precipitation events, its importance as an object of investigation is readily justified.

The methodology consisted in the screening of 73 reports ceded by the Geo-RIO Foundation related to significant rainfall events (SRE) occurred between years 2010 and 2015 in the research area. The screening was carried out in order to guarantee that all occurrences had the rainfall component associated to them. For the purpose of treatment, analysis and spatialisation of occurrences, a database was created and the coordinates verified using both ArcGis 10.3 and Google Earth softwares. The classification of mass movement typologies was based on the textual and photographic records contained in the reports, according to the Varnes (1958) classification scheme. General new terms were added to the classical scheme when the typology of a specific event could not be discerned. Then the produced thematic maps allowed the crossing of environmental attributes with each single location, generating first-round statistics. Following this, crossings between two or more attributes were conducted, generating correlation statistics between several attributes. Finally, a principal component analysis (PCA) was performed using four quantitative variables for the entire database, which was later broken down into groupings according to qualitative attributes, resulting in a diagnosis of the associative dynamics among variables and their relative individual contribution in any given grouping of events.

Concave curvature slope profiles (75%), residential and favela areas (67.7%), biotite gneiss or banded gneiss lithologies (58.8%) and distance up to 100m (47.1%) to the nearest alignment were identified as the main risk-building factors within the study area. Most events consist of translational landslides (> 17.8%), mobilizing small volumes

(58%) of residual soil more than 2m thick (79.4%). Rockfalls (7.4% of the total) occur mostly in gneisses (80%). Larger events occur within a 100m radius of the nearest alignment (75%), in favelas or residential areas (75%) and on gneisses (75%). The triggering factors are diverse and the relation between them differs from place to place, justifying the continuous efforts to the compartmentalization of similar geological-geotechnical-geomorphological domains in order enhance the predictability of potentially hazardous events at a local level.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa da Área do Maciço da Pedra Branca	26
Figura 2 – Compartimentação Tectônica do Sudeste do Brasil	28
Figura 3 – Mapa Geológico do Município do Rio de Janeiro	31
Figura 4 – Precipitação Média Anual do Município	33
Figura 5 – Totais Pluviométricos Médios Mensais	34
Figura 6 – Mapa das Ocorrências	47
Figura 7 – Mapa de Inclinação	48
Figura 8 – Mapa de Curvaturas em Plano	49
Figura 9 – Mapa de Curvaturas em Perfil	49
Figura 10 – Mapa de Orientação de Vertentes	50
Figura 11 – Mapa de Lineamentos	51
Figura 12 – Mapa de Densidade de Lineamentos	52
Figura 13 – Gráfico de Volumes Mobilizados	53
Figura 14 – Tipologia Varnes (modificada)	54
Figura 15 – Gráfico de Curvaturas	55
Figura 16 – Ocorrências distribuídas segundo a geometria do terreno	55
Figura 17 – Rosa dos Ventos da Orientação de Vertentes	56
Figura 18 – Histograma de Inclinação	57
Figura 19 – Histograma de Densidade de Lineamentos	58
Figura 20 – Histograma de Distância de Lineamentos	59
Figura 21 – Gráfico ocorrências x unidades geotécnicas	60
Figura 22 – Gráfico de Ocorrências x Litologia	61
Figura 23 – Ocorrências x uso e ocupação do solo	62
Figura 24 – Gráfico Tipologia Varnes x Volume Mobilizado	63
Figura 25 – Histograma de Distâncias aos Lienamentos x Volume Mobilizado . .	63
Figura 26 – Quadro do Histograma de Distância ao Lineamento x Volume Mobilizado	63
Figura 27 – Gráfico de Uso do Solo x Volume Mobilizado	64
Figura 28 – Gráfico de Litologia x Volume Mobilizado	65
Figura 29 – Tipologia Varnes x Litologia	65
Figura 30 – Histogramas de Litologia x Densidade de Lineamentos	66
Figura 31 – Histogramas de Litologia x Distância	67
Figura 32 – Gráfico de Uso do Solo x Litologia	68
Figura 33 – Tipologia Varnes x Distância ao Lineamento mais Próximo	69
Figura 34 – Gráfico de Dispersão de Distância x Densidade de Lineamentos . .	70
Figura 35 – Diagrama Curvatura em Plano x Curvatura em Perfil x Distância ao Lineamento mais Próximo	70

Figura 36 – Histogramas de Uso do Solo x Distância	71
Figura 37 – Diagrama do PCA Geral	73
Figura 38 – PCA's em "X"	75
Figura 39 – PCA's em "T"	77

Lista de quadros

Quadro 1 – Tabela de Classificação de Tipologia Varnes	21
Quadro 2 – Tabela de Fatores Efetivos	25
Quadro 3 – Critérios para a Definição de EPS	36
Quadro 4 – Classificação de Tipologias adotada pela Geo-Rio	38
Quadro 5 – Classificações da Geometria de Encostas	40
Quadro 6 – Classificação de Orientações de Vertentes	41
Quadro 7 – Tabela de Combinações de Atributos	43
Quadro 8 – Quadro do Histograma de Densidade de Lineamentos x Litologia .	66
Quadro 9 – Quadro do Histograma de Distâncias ao Lineamento mais Próximo x Litologia	68
Quadro 10 – Tabela dos Histogramas de Uso do Solo x Distância	71
Quadro 11 – Resultado da Primeira Iteração	72
Quadro 12 – Resultado da Segunda Iteração	72
Quadro 13 – Quadro do Diagrama Quantitativo Geral	73
Quadro 14 – PCA's segundo atributos qualitativos	75
Quadro 15 – Quadro Resumitivo dos Diagramas 1 a 5	76
Quadro 16 – Quadro Resumitivo dos Diagramas 6 a 11	78

Lista de abreviaturas e siglas

CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DEM	Digital Elevation Model
DTM	Digital Terrain Model
EPS	Evento Pluviométrico Significativo
INEA	Instituto Estadual do meio Ambiente
LIDAR	Light Detection and Ranging
MLC	Maximum Likelihood Classification
MPB	Maciço da Pedra Branca
PCA	Principal Component Analysis
PEPB	Parque Estadual da Pedra Branca
PGA	Peak Ground Acceleration
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIN	Triangular Irregular Networks
USCS	Unified Soil Classification System
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos (United States Geological Survey)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
2	MOVIMENTOS DE MASSA	20
2.1	Tipologias dos Movimentos de Massa	20
2.1.1	Classificação de Varnes	21
2.1.1.1	Quedas (<i>Fall</i>)	21
2.1.1.2	Tombamentos (<i>Toppling</i>)	22
2.1.1.3	Deslizamentos (<i>Slides</i>)	22
2.1.1.3.1	<i>Deslizamentos Rotacionais</i>	22
2.1.1.3.2	<i>Deslizamentos Translacionais</i>	22
2.1.1.4	Espalhamento lateral (<i>Lateral spread</i>)	23
2.1.1.5	Fluxos (<i>Flows</i>)	23
2.2	Variáveis Ambientais e Movimentos de Massa	24
3	CARACTERIZAÇÃO GERAL DO MACIÇO DA PEDRA BRANCA	26
3.1	Localização e Extensão	26
3.2	Geologia	27
3.2.1	Faixa Ribeira e Arco Magmático Rio Negro	27
3.2.2	Unidades Litoestratigráficas da folha Baía de Guanabara aflorantes na área de estudo	28
3.3	Geomorfologia	31
3.4	Clima	32
3.5	Ocupação Humana	34
4	METODOLOGIA	36
4.1	Fonte dos Dados e Critérios de Escolha das Ocorrências	36
4.2	Espacialização dos Dados	37
4.3	Análise e Reclassificação de Tipologias	37
4.4	Produção de Mapas de Atributos Físicos	39
4.4.1	Mapa de Inclinação	39
4.4.2	Mapas de Curvatura	39
4.4.3	Mapa de Orientação de Vertentes	40
4.4.4	Mapa de Lineamentos	41
4.4.5	Mapa de Densidade de Lineamentos	41
4.5	Cruzamento dos Dados e Estatísticas Preliminares	42
4.6	Análise de Componentes Principais (PCA)	43

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	Mapas de Apoio (Espacialização e Atributos Físicos)	45
5.1.1	Mapa das Ocorrências	45
5.1.2	Mapa de Inclinação	45
5.1.3	Mapas de Curvatura de Encosta	45
5.1.4	Mapa de Orientação de Vertentes	45
5.1.5	Mapa de Lineamentos	46
5.1.6	Mapa de Densidade de Lineamentos	46
5.2	Ocorrências x Atributos Mecânicos	53
5.2.1	Volume Mobilizado	53
5.2.2	Tipologias de Movimento de Massa	53
5.3	Ocorrências x Atributos Geomorfológicos	54
5.3.1	Geometria de Encosta	54
5.3.2	Orientação de Vertentes	56
5.3.3	Inclinação	56
5.4	Ocorrências x Atributos Litológico-Estruturais	58
5.4.1	Densidade de Lineamentos	58
5.4.2	Distância de Lineamentos	58
5.4.3	Geotecnia	59
5.4.4	Litologia	60
5.5	Ocorrências x Atributos do Espaço Geográfico	61
5.5.1	Uso do Solo	61
5.6	Ocorrências e Combinações de Atributos	62
5.6.1	Volume Mobilizado	62
5.6.2	Litologia	65
5.6.3	Distância ao Lineamento mais Próximo	68
5.7	Análise de Componentes Principais (PCA)	71
5.7.1	Diagrama Quantitativo Geral	71
5.7.2	Diagramas segundo Atributos Qualitativos	74
6	CONCLUSÃO	79
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
	REFERÊNCIAS	83

1 Introdução

A cidade do Rio de Janeiro possui um histórico de desastres relacionados a chuvas. Devido às suas características geológicas e geográficas, na área que compreende o município ocorrem grandes precipitações pluviométricas e consequentemente a deflagração de movimentos de massa. A explosão populacional experimentada desde meados do século passado veio acompanhada de profundas modificações na paisagem local e de problemas diversos relacionados a esta ocupação. O desmatamento de áreas antes cobertas por vegetação nativa, a ocupação desordenada das encostas e de áreas pantanosas, bem como a crescente impermeabilização do solo e a canalização de drenagens modificaram a dinâmica dos processos naturais, ampliando a possibilidade de ocorrência de desastres naturais e mistos (aqueles intensificados ou promovidos pela ação antrópica sobre o meio natural). Tal cenário não é exclusivo da cidade do Rio de Janeiro, mas comum a muitas cidades brasileiras e de países em desenvolvimento, o que torna essa questão relevante para muito além do âmbito local. A maioria das ocorrências geológico-geotécnicas concentra-se nas áreas de relevo acidentado e de grande densidade populacional, condições comuns no município devido às áreas montanhosas e grande população residente na cidade. As áreas mais significativas em termos de ocorrência de movimentos de massa são os Maciços da Tijuca, com aproximadamente 120 km² e o da Pedra Branca (MPB), com aproximadamente 169 km²) que juntos cobrem 23,7% da área total do município. Este último foi escolhido como a área de estudo deste trabalho.

Para a Defesa Civil municipal do Rio de Janeiro, o deslizamento de encostas é o maior problema decorrente das chuvas fortes, em virtude dos danos humanos (mortos e feridos) causados por estes desastres (DEFESA CIVIL E SECRETARIA DE ORDEM PÚBLICA, 2013). Numa tentativa de minimizar os seus efeitos negativos sobre o município, foi criado em 1996 um sistema de alerta de deslizamentos, o sistema Alerta Rio, que leva em consideração as precipitações diárias e acumuladas como fator de análise para a emissão de alertas de deslizamentos com o objetivo de minimizar as consequências negativas destes eventos e aumentar a resiliência da cidade. A chuva é reconhecida mundialmente como um dos principais agentes não antrópicos na deflagração de movimentos de massa e o principal agente em regiões de clima tropical (PARIZZI et al., 2010), no entanto não é o único fator.

Diversos autores se dedicaram à identificação de fatores efetivos (inerentes às rochas e aos solos) na avaliação de áreas de risco para a produção de mapas de risco e susceptibilidade a movimentos de massa, utilizando-se de modelos empíricos ou teóricos, através da aplicação de métodos estatísticos. Exemplos: Wu, W.;

Sidle, R.C. (1995) e Liu et al. (2013) avaliaram tanto fatores ditos internos (litologia, geomorfologia, inclinação, orientação de vertentes, altitude, propriedades do solo, cobertura de vegetação, distribuição de fluxos superficiais e fraturas) quanto externos (precipitação, terremotos e enchentes) como fatores importantes na deflagração de deslizamentos. Este último aplicou estes fatores na construção de um modelo empírico de susceptibilidade a deslizamentos utilizando dados de um período de observação de 60 anos na China. Já Ding e Hu (2014), estudando deslizamentos provocados por terremotos, levaram em conta o uso do solo, intensidade sísmica, precipitação média anual, inclinação, curvatura e litologia na produção de um mapa de risco utilizando-se de métodos de clusterização e MLC (*maximum likelihood classification*). Xu e Xu (2014), também estudando deslizamentos causados por terremotos na China, consideraram na análise a altitude, inclinação, orientação de vertentes, posição de vertentes, distância de drenagens, litologia, distância da superfície de ruptura e aceleração máxima (peak ground acceleration - PGA). Wang et al. (2012) levaram em conta também o inventário de deslizamentos passados e as distâncias de ferrovias e estradas na construção de um mapa de susceptibilidade a deslizamentos, construído utilizando-se de um modelo ponderado de combinações lineares de atributos, resultando na classificação da área de estudo em quatro categorias de risco: baixo, moderado, moderado-alto e alto. Alexakis, D. D.; Agapiou, A.; Tzouvaras, M.; Themistocleous, K.; Neocleous, K.; Michaelides, S. (2014) utilizaram-se de mapeamento por sensoriamento remoto e uso de GIS para a produção de mapas de atributos físicos na produção de um modelo teórico de risco para uma região de Chipre, além de um modelo estatístico (CA Markov) no delineamento de zonas de riscos para o futuro segundo as expectativas de desenvolvimento da região. Das e Stein (2016) verificaram que a utilização das variáveis litologia, uso do solo, distribuição de estradas, densidade de drenagens e unidades de solo em um modelo de pontos múltiplos melhorou significativamente a resolução deste método estatístico na análise de deslizamentos. Sidle e Bogaard (2016) avaliaram a correlação entre processos/atributos hidrológicos, geomorfológicos, geotécnicos, pedológicos, geológicos, hidroquímicos e biológicos em deslizamentos causados por aumento na propressão e diminuição da sucção em solos. Soeters e vanWesten (1996) fizeram uma extensiva revisão das abordagens possíveis na avaliação de risco de movimentos de massa, na produção de mapas de risco, dos tipos de manipulação estatística de dados de deslizamentos e de uma série de outros temas relacionados, incluindo técnicas com uso de GIS. No seu trabalho listam, por exemplo, 23 variáveis/atributos efetivos que podem ser usados na avaliação de riscos, além de técnicas de análise de dados, dentre as quais a análise estatística multivariada, utilizada neste trabalho.

Seguindo a abordagem multifatorial dos estudos supracitados, este trabalho busca desenvolver correlações entre as variáveis efetivas nas áreas do MPB a partir de uma base de dados histórica entre os anos de 2010 e 2015 utilizando-se de ferramentas

de geoprocessamento e métodos estatísticos. No presente estudo oito variáveis efetivas são levadas em consideração na avaliação de susceptibilidade a movimentos de massa na área do MPB: litologia, geotecnia, inclinação de vertentes, uso do solo, orientação de vertentes, geomorfologia (curvaturas em plano e em perfil), distância ao lineamento mais próximo e densidade de lineamentos. Além destes dois atributos específicos de cada ocorrência são levados em consideração: o volume mobilizado em cada evento e a tipologia do movimento de massa. O objetivo primário deste trabalho é identificar quais destes fatores efetivos têm maior influência na área de estudo e as relações entre eles, investigando se existem uma ou mais combinações de fatores que atuam conjuntamente na deflagração dos movimentos de massa. Como objetivo secundário espera-se que esta investigação contribua com a compreensão da dinâmica destes processos/atributos naturais, beneficiando a avaliação de risco de deslizamentos e o refinamento e efetividade dos protocolos de planejamento urbano e de defesa civil para a minimização dos riscos na a área de estudo.

Esta pesquisa está inserida dentro da cooperação entre profissionais da Instituição Geo-Rio e do Laboratório de Mecânica e Tecnologia de Rochas (LEMETRO), parte do departamento de geologia da UFRJ.

2 Movimentos de Massa

Os movimentos de massa são parte dos processos superficiais que modelam o relevo do planeta. Sua origem se remonta a uma grande diversidade de processos geológicos, hidrometeorológicos, químicos e mecânicos que têm lugar na superfície da crosta terrestre. Por um lado os movimentos tectônicos formam montanhas e por outro os processos de intemperismo, as chuvas, os sismos e outros eventos (incluindo a intervenção antrópica) atuam sobre as encostas, desestabilizando-as e mudando o relevo para uma condição mais plana (PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS, PMA:GCA, 2007). Alguns movimentos de massa, como o rastejamento de solos, são lentos, às vezes imperceptíveis e difusos, enquanto outros, como alguns deslizamentos de terra, podem atingir altas velocidades e podem definir-se com limites claros, determinados por superfícies de ruptura (Crozier, 1999a, em Glade e Crozier, 2005 *apud* PMA:GCA, 2007).

A definição de deslizamentos (em inglês norte-americano: *landslides*) proposta por Cruden (1991) é que “um deslizamento é um movimento de uma massa de rocha, de terra ou de detritos encosta abaixo”. Uma definição mais técnica é dada por Terzaghi (1950): “um rápido deslocamento de uma massa de rocha, solo residual ou sedimentos adjacentes a uma encosta, cujo o movimento do centro de gravidade avança para baixo e para fora.” Segundo o Tominaga, L.K, Santoro, J. e Amaral, R. (2009), movimento de massa é o movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais de vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos.

2.1 Tipologias dos Movimentos de Massa

Os movimentos de massa podem ser classificados de várias maneiras, cada uma tendo alguma utilidade ao enfatizar características pertinentes no reconhecimento, prevenção, controle, correção ou outro propósito de classificação. Entre os critérios que têm sido utilizados para a identificação e classificação estão o tipo de movimento, tipo de material, taxa de movimento, geometrias da área colapsada e o depósito resultante, idade, mecanismos de deflagração, grau de integridade da massa deslocada, relação ou falta de relação da geometria do deslizamento com a estrutura geológica local, localização geográfica, estado de atividade (VARNES D.J., 1978). Recentemente, Hungr, Leroueil e Picarelli (2014) publicaram um artigo revisando alguns aspectos da classificação de Varnes, expandindo de 29 para 32 o número de classes de movimentos

de massa com ênfase na nomenclatura do material deslocado e nos mecanismos de ruptura. No entanto, as classificações dos movimentos de massa de Varnes (1958, 1978) e Hutchinson (1968, 1988) são ainda hoje os sistemas mais amplamente aceitos no mundo (PMA:GCA, 2007).

2.1.1 Classificação de Varnes

Em seu artigo de 1978, Varnes introduz sua classificação da seguinte maneira: *“Os principais critérios utilizados na classificação apresentada aqui são, como em 1958, o tipo de movimento primeiramente e o tipo de material secundariamente. Os tipos de movimento (. . .) são divididos em cinco grupos principais: quedas, tombamentos, deslizamentos, espalhamentos e fluxos. Um sexto grupo, de movimentos complexos, inclui combinações de dois ou mais dos outros cinco tipos. Os materiais são divididos em duas classes: rocha e solo de engenharia; o solo é ainda subdividido em detritos e terra.”* O quadro 1 mostra o sistema de classificação de forma simplificada:

Tipo de Movimento		Tipo de material	
Quedas		Rocha	Solo
Tombamentos			Granulometria grosseira: detritos Granulometria fina: terra
Deslizamento	Translacional		
	Rotacional		
Espalhamento lateral			
Fluxos			
Complexo		Combinação de dois ou mais movimentos	

Quadro 1 – Classificação de Tipologia Varnes - Fonte: Varnes, D.J., 1978 (modificado)

Esta classificação é suficiente para embarcar os casos abordados no presente trabalho. Segue-se uma breve descrição retirada de Varnes D.J. (1978) para as cinco tipologias principais presentes na Tabela 1.

2.1.1.1 Quedas (*Fall*)

Nas quedas uma massa de qualquer tamanho é separada de uma encosta íngreme ou penhasco ao longo de uma superfície em que se dá pouco ou nenhum cisalhamento, normalmente vem abaixo através do ar por queda livre, salto, ricochete ou rolamento. Os movimentos são muito rápidos a extremamente rápidos e podem ou não ser precedidos de movimentos menores que causem a separação progressiva da massa de sua fonte.

2.1.1.2 Tombamentos (*Toppling*)

Este tipo de movimento consiste na rotação para longe da face do talude/encosta de uma unidade ou de unidades em torno de algum ponto de articulação, abaixo ou a um nível mais abaixo na unidade, sob a ação da gravidade e forças exercidas por unidades adjacentes ou por fluidos em fraturas. É um processo de inclinação progressiva em que o colapso da massa deslocada ocorre ao fim do movimento. Tombamentos podem culminar em quedas ou deslizamentos dependendo da geometria da massa em movimento e da orientação e extensão das suas descontinuidades internas.

2.1.1.3 Deslizamentos (*Slides*)

Nos deslizamentos o movimento consiste no cisalhamento e deslocamento ao longo de uma ou várias superfícies visíveis ou que podem ser razoavelmente inferidas, ou dentro de uma zona relativamente estreita. O movimento pode ser progressivo; isto é, a princípio a ruptura por cisalhamento pode não ocorrer simultaneamente ao longo do que eventualmente se tornará uma superfície definida de ruptura, mas se propagar a partir de uma área onde primeiro houve ruptura. A massa deslocada pode deslizar além da superfície original por sobre o solo, que então se torna uma superfície de separação. Podem ser ainda classificados em deslizamentos rotacionais e translacionais.

2.1.1.3.1 *Deslizamentos Rotacionais*

São deslizamentos ao longo de uma superfície de ruptura curva de concavidade para cima. As fraturas expostas são concêntricas em plano e côncavas em direção ao sentido do movimento. Em muitos deslizamentos rotacionais, a superfície de ruptura juntamente com as escarpas expostas possui um formato de colher. Deslizamentos puramente rotacionais em superfícies de curvatura suave são relativamente incomuns entre os muitos tipos de movimento gravitacional a que os materiais geológicos estão sujeitos. Uma vez que ocorrem com maior frequência em materiais bastante homogêneos, sua incidência em taludes e aterros construídos bem como seu interesse para os engenheiros é maior em comparação às demais tipologias.

2.1.1.3.2 *Deslizamentos Translacionais*

Em deslizamentos translacionais, a massa se move para fora ou para baixo e ao longo de uma superfície mais ou menos planar ou suavemente ondulada com pouco movimento rotativo ou inclinação de blocos para trás característica dos deslizamentos rotacionais. A massa geralmente desliza para além da área de ruptura por sobre a superfície do solo original. Deslizamentos translacionais têm comumente controle estrutural de superfícies de fraqueza tais como falhas, juntas, planos de acamamento e

variações na resistência ao cisalhamento entre camadas ou pelo contato entre a rocha mãe e os detritos subjacentes.

2.1.1.4 Espalhamento lateral (*Lateral spread*)

Nos espalhamentos, o modo de movimento dominante é a extensão lateral acomodada por fraturas de cisalhamento ou tração. Dois tipos podem ser distinguidos:

1. A soma dos movimentos resulta na extensão geral, mas sem uma superfície basal de cisalhamento ou zona plástica reconhecida ou bem definida. A mecânica do movimento não é bem conhecida.

2. Os movimentos podem envolver a fratura e a extensão de material coerente, tanto rocha ou solo, devido à liquefação ou ao fluxo plástico do material subjacente. As unidades superiores coerentes podem afundar, translacionar, rotacionar, se desagregar ou podem se liquefazer e fluir.

A extensão lateral desses deslizamentos é notável, envolvendo faixas que chegam a muitos quilômetros de largura em torno de bordas de planaltos e escarpamentos. Espalhamentos se formam geralmente em material de granulometria fina em encostas suaves, particularmente em silte e argila que perdem a maioria ou a totalidade da sua resistência ao cisalhamento quando sofrem alguma perturbação ou remodelação. O seu avanço é progressivo, se estendendo retrogressivamente desde a zona de ruptura inicial (normalmente próxima a um corpo d'água) cada vez mais longe e adentro da terra firme.

2.1.1.5 Fluxos (*Flows*)

Movimentos de materiais não consolidados geralmente assumem a forma de fluxos bastante evidentes, rápidos ou lentos, saturados ou secos. Os movimentos de fluxo em rocha geralmente são extremamente lentos e aparentemente mais ou menos estáveis no tempo, apesar da escassez de dados. Os movimentos de fluxo podem resultar em dobras, deformações, arqueamentos ou outras manifestações de comportamento plástico. Os movimentos de detritos e de terra são mais facilmente reconhecidos como fluxos do que aqueles em rochas, porque os deslocamentos relativos são geralmente maiores e a aparência geral é mais obviamente a de um corpo que se comportou como um fluido. Nestes casos o efeito fluidizante da própria água é, como regra, uma parte do processo.

Os fluxos de detritos e fluxos de lama são distinguidos com base no tamanho de partícula. O termo “detritos” denota material que contém uma porcentagem relativamente alta de fragmentos de granulometria grosseira, enquanto que o termo fluxo de lama é reservado para um fluxo de terra consistindo em um material que esteja saturado

o suficiente para fluir rapidamente e que contém pelo menos 50% de areia, silte e argilosa. Os fluxos de detritos geralmente resultam de precipitação excepcionalmente pesada ou de degelo de neve ou de solo congelado.

2.2 Variáveis Ambientais e Movimentos de Massa

Fenômenos de instabilidade de encostas estão relacionados a uma variedade de fatores que envolvem tanto o meio físico quanto as interações humanas. Assim, a avaliação de risco de movimentos de massa requer conhecimento a respeito de tais fatores, que vão desde a geologia estrutural até o uso do solo. Por esta razão a avaliação de riscos deve preferencialmente envolver um time multidisciplinar (Soeters, e van Westen, 1996).

Ainda segundo os mesmos autores, existe grande quantidade de pesquisas sobre riscos de instabilidade de taludes nos últimos 30 anos, com as investigações a respeito do tema inicialmente tendo sido orientadas no sentido de solucionar problemas de instabilidade em locais específicos, caso a caso. Da mesma forma, a pesquisa investiu na investigação a nível local e em modelos determinísticos e probabilísticos. No entanto, a heterogeneidade do meio natural a nível regional e a grande variabilidade das propriedades geotécnicas contrastam intensamente com a homogeneidade necessária aos modelos determinísticos. Atualmente vários outros tipos de abordagem metodológica se baseiam em um estudo cuidadoso das condições naturais de uma determinada área e na análise de todos os possíveis parâmetros envolvidos em processos de instabilidade de encostas, que são de cinco grandes grupos principais: geomorfologia, topografia, geologia, uso do solo e hidrologia, listados no quadro 2 a seguir:

Camada de Dados	Informações em tabelas afins
Geomorfologia	
1. Domínio Geomorfológico	Domínio Geomorfológico
2. Sub-unidades geomorfológicas	Descrição geomorfológica
3. Deslizamentos (recentes)	Tipo, atividade, profundidade, dimensões
4. Deslizamentos (antigos)	Tipo, atividade, profundidade, dimensões
Topografia	
5. Digital terrain model (DTM)	Classes de altitude
6. Mapa de Inclinação	Classes de inclinação
7. Mapa de orientação de vertentes	Classes de orientação de vertentes
8. Comprimento de vertentes	Classes de comprimento
9. Concavidade/convexidade	Concavidades/convexidades
Geologia	
10. Litologia	Litologia, resistência da rocha, grau de fraturamento
11. Geotecnia	Tipos de material, profundidade, classificação USCS, granulometria, densidade, c e ϕ
12. Mapa de geologia estrutural	Tipo de falha, dip, dip direction, comprimento, eixo de dobra
13. Aceleração Sísmica	Peak ground acceleration (PGA)
Uso do Solo	
14. Infraestrutura (recente)	Tipos de rodovias, ferrovias, expansão urbana
15. Infraestrutura (antiga)	Tipos de rodovias, ferrovias, expansão urbana
16. Mapa de uso do solo (recente)	Uso do solo, densidade de árvores, profundidade de raízes
17. Mapa de uso do solo (antigo)	Uso do solo
Hidrologia	
18. Rede de drenagem	Tipo, ordem, comprimento
19. Bacias hidrográficas	Ordem, tamanho
20. Precipitação	Precipitação no tempo
21. Temperatura	Temperatura no tempo
22. Evapotranspiração	Evapotranspiração no tempo
23. Mapas de lençol freático	Variação do nível freático no tempo

Quadro 2 – Possíveis camadas de dados/atributos e metadados associados levados em consideração no reconhecimento, análise e zonação da instabilidade de encostas - Fonte: Soeters e van Westen, 1996 (modificado)

Soeters e van Westen, 1996 (modificado)

3 Caracterização Geral do Maciço da Pedra Branca

3.1 Localização e Extensão

O município do Rio de Janeiro é marcado por um contraste topográfico – as baixadas litorâneas e as montanhas. A paisagem física do Rio de Janeiro é, portanto, ressaltada pelas belezas naturais de seus três maciços litorâneos: maciço da Tijuca, maciço do Gericinó-Mendanha e maciço da Pedra Branca (figura 1). O primeiro tem maior destaque na fisionomia da cidade, não só por ser o mais conhecido internacionalmente, como por abrigar a Floresta da Tijuca e o Parque Nacional da Tijuca“ (Costa, 1986 *apud* Costa (2006)).



Figura 1 – Contorno da área do maciço da Pedra Branca no município do Rio de Janeiro - Fonte: ArcGis® 10.3 - Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

A unidade de conservação que abrange grande parte da área do MPB foi criada através da Lei Estadual n.º 2.377, de 28 de junho de 1974, correspondendo a toda a área elevada do maciço acima da cota altimétrica de 100m. A unidade abrange uma área de 12.398 ha (aproximadamente 124 km²), cerca de 16% da área do município, em que 40% dele ainda encontra-se recoberto pela Mata Atlântica em diferentes

estágios sucessionais (COSTA, op. cit.). Segundo o INEA (2018), o parque situa-se inteiramente na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro, fazendo limite com os seguintes bairros: Jacarepaguá, Taquara, Camorim, Vargem Pequena, Vargem Grande, Recreio dos Bandeirantes, Grumari, Padre Miguel, Bangu, Senador Camará, Jardim Sulacap, Realengo, Santíssimo, Campo Grande, Senador Vasconcelos, Guaratiba e Barra de Guaratiba. Segundo o órgão ambiental, os objetivos da unidade são: preservar o remanescente florestal localizado em ponto estratégico do Rio de Janeiro e área núcleo de biodiversidade da Mata Atlântica; preservar mananciais hídricos ameaçados pela expansão urbana; proteger paisagens naturais e pouco alteradas de notável beleza cênica no seu interior; proteger e revitalizar construções históricas, ruínas e sítios arqueológicos; proporcionar meios e incentivos para atividades de pesquisa científica e monitoramento; promover aos visitantes oportunidades de recreação ao ar livre e valorizar econômica e socialmente a diversidade biológica, com o aproveitamento dos serviços ambientais que o parque disponibiliza.

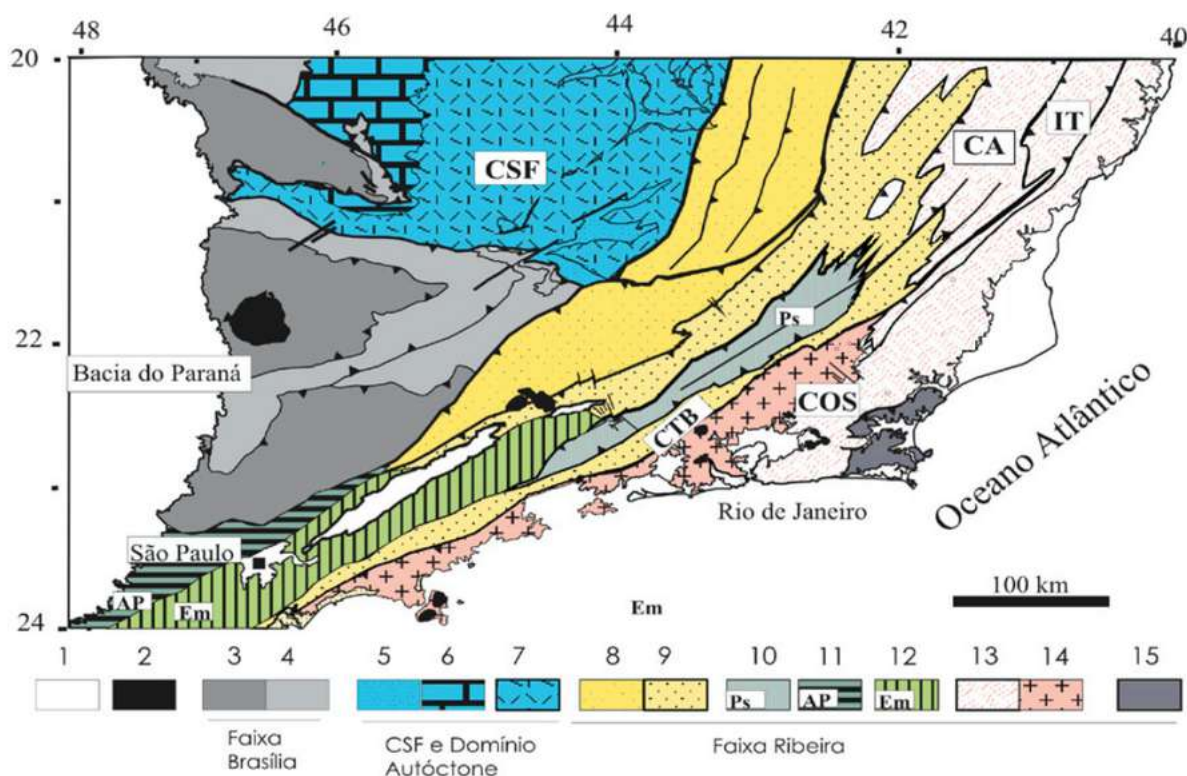
3.2 Geologia

3.2.1 Faixa Ribeira e Arco Magmático Rio Negro

A unidade geomorfológica do Maciço da Pedra Branca é formada por rochas do embasamento cristalino da região sudeste brasileira, sendo parte de um importante cinturão orogênico que se estende paralelamente ao litoral, denominado de Faixa Ribeira, que por sua vez integra um sistema orogênico maior, incluso na Província Mantiqueira (Almeida *et al.*, 1977, 1981 *apud* CPRM e UERJ (2012)). Os diversos terrenos tectônico-estratigráficos que constituem a Faixa Ribeira são limitados por importantes descontinuidades estruturais: empurrões e zonas de cisalhamento transpressivas subverticais, normalmente destrais. Estes terrenos tectônicos foram progressivamente acrescidos junto às bordas cratônicas e às faixas móveis (terrenos) colididas previamente, em vários episódios colisionais (ca. 630 Ma; 605 Ma; 580 Ma e 520 Ma) (CPRM/UERJ 2012). O Terreno Ocidental compreende os domínios tectônicos Andrelândia e Juiz de Fora. Já o Terreno Oriental, justaposto ao primeiro foi subdividido em três compartimentos tectônicos, Cambuci, Costeiro e Italva, ligados ao desenvolvimento de arcos magmáticos neoproterozóicos neste segmento da faixa (TUPINAMBÁ, 2007). As últimas manifestações tectono-magmáticas ligadas a Orogênese Brasileira neste setor da Faixa Ribeira datam do Cambriano Superior ao Ordoviciano Superior (ca. 510-480 Ma) e são interpretadas como sendo relacionadas ao colapso orogênico já em regime transtensivo (Heilbron *et al.*, 2000; 2004; 2009; Trouw *et al.*, 2000 *apud* CPRM/UERJ 2012).

Como se vê na figura 2, o município do Rio de Janeiro encontra-se como um

todo situado no Terreno Oriental, no compartimento Costeiro e dentro do domínio do Arco Magmático Rio Negro. Este arco é constituído por paragneisses pelíticas ricos em interações de quartzitos e calcissilicáticas e ortogneisses com afinidade calialcalina e composição variando desde tonalítica até granítica, com enclaves dioríticos e gabróicos. Os dados geoquímicos e isotópicos sugerem pelo menos dois estágios de desenvolvimento do arco magmático, um mais antigo há ca. 790 Ma, e outro com ca. 635–620 Ma (Heilbron & Machado, 2003; Tupinambá et al. 2000 *apud* CPRM;UERJ 2012).



Legenda: 1-Coberturas Fanerozoicas; 2- Rochas Alcalinas do K/Eoceno; 3 a 4: Faixa Brasília: 3-Domínio Externo, 4- Domínio Interno; 5 a 7: Craton do São Francisco e Domínio autóctone: 5- Megasequência Andrelândia autóctone, 6- Supergrupo Bambuí, 7- Embasamento cratônico; 8 a 15: terrenos da Faixa Ribeira: 8- Terreno Ocidental/Domínio Andrelândia, 9- Terreno Ocidental/Domínio Juiz de Fora, 10- Terreno Paraíba do Sul, 11- Terreno Apiaí, 12- Terreno Embú, 13- Terreno Oriental: Ca- Domínio Cambuci, IT- Klippe Italva, Cos-Domínio Costeiro, 14- Terreno Oriental/Arco magmático Rio Negro, 15- Terreno Cabo Frio

Figura 2 – Mapa da compartimentação tectônica do Sudeste, mostrando ao centro a faixa Ribeira - Fonte: Tupinambá, M., 2007 - modificado de Heilbron et al. 2004a

3.2.2 Unidades Litoestratigráficas da folha Baía de Guanabara aflorantes na área de estudo

As descrições a seguir estão em ordem cronológica das principais unidades litológicas da área do MPB. As descrições dos litotipos têm como base o relatório da CPRM-UERJ sobre os recursos minerais da folha Guanabara (CPRM/UERJ, 2012). A

figura 3 mostra o mapa geológico cedido pela Fundação Geo-Rio (2014) e usado como referência neste trabalho.

- Grupo São Fidélis (*biotita gnaisses*): Neste conjunto predominam sillimanita-granada biotita gnaisses quartzo-feldspáticos, geralmente com um bandamento definido por biotita, quartzo e feldspato. Caracteristicamente estes gnaisses contêm frequentes camadas e lentes de espessuras decimétricas a métricas, passíveis de espessamento por dobramento isoclinal, de quartzitos feldspáticos, portadores biotita, muscovita e localmente grafita. A unidade apresenta também freqüentes lentes de calcio-silicáticas, portadoras de plagioclásio, diopsídio, escapolita e, mais raramente, de anfíbolitos.
- Complexo Rio Negro: Corresponde a um conjunto de rochas gnáissicas e migmatíticas de inequívoco caráter magmático. Inclui gnaisses de composição básica a intermediária. As rochas apresentam evolução policíclica com complexa estruturação, com idade datada a partir de zircões de 635 ± 10 Ma (Tupinambá, 1999; Tupinambá et al. 2000). São representantes do complexo na área de estudo:

Gnaisse Migmatítico: Na área do Maciço da Pedra Branca, porção sudoeste da Folha Baía de Guanabara, ocorre um quartzo-plagioclásio-biotita gnaisse (composição quartzo diorítica a diorítica) intensamente deformado e migmatizado, apresentando dobras intrafoliais apertadas, com padrões de interferência de dobramentos e com conspícua transposição da foliação. Trata-se de rocha fortemente bandada, migmatizada e, considerando-se o intenso nível de deformação, pode ser assumido que o bandamento, com segregação de leitos félsicos e máficos, seja fruto de diferenciação metamórfica.

Gnaisse bandado Archer : este termo corresponde a litotipos que variam, em composição, de quartzo dioritos a granodioritos, portanto com predomínio de plagioclásio em relação ao alcalifeldspato. São rochas de tons escuros, polideformadas, migmatizadas, com interdigitações de bandas anfíbolíticas (diques/soleiras). Trata-se de rocha inequigranular, com textura fortemente bandada, onde duas bandas são individualizadas: uma félsica (dominante em volume) e outra máfica. Processos de anatexia, ainda que incipientes, são observados e a eles relacionam-se leucossomas de composição granítica aleitados ao longo do plano da foliação, bem como venulações aplíticas que cortam discordantemente a foliação gnáissica. Apresenta ampla variação textural, desde tipos bandados até semi-facoidais.

- Suíte Rosilha (*granodiorito, tonalito e quartzodiorito*): O chamado Tonalito Tachas apresenta litotipos que variam composicionalmente entre tonalitos e granodioritos.

Ocorre em dois segmentos dentro do MPB. O primeiro segmento está definido ao longo de uma faixa que se estende desde a região da Ilha de Guaratiba (flanco oeste do Maciço da Pedra Branca), até a área do Pico da Pedra Branca, na parte central do Maciço. O exame megascópico permite identificar plagioclásio, quartzo, anfibólio, biotita e K-feldspato (raro). É uma rocha de cor cinza, leuco a mesocrática com textura glomeroporfirítica típica. Sua granulação varia de média a grossa (2 a 5 mm), com matriz formada por quartzo, plagioclásio, biotita e hornblenda (raro ortoclásio).

- Suíte Suruí (*granito Pedra Branca*): É um litotipo tipicamente de caráter tardi- a pós-colisional, datado em 513 ± 5 Ma, pelo método U-Pb (LA-ICPMS) em zircão (Heilbron & Machado, 2003 *apud* CPRM;UERJ, 2012). Trata-se de um granito porfirítico, rico em megacristais de microclina peritítica que sobressaem em uma matriz de composição monzogranítica. O granito Pedra Branca aflora sob forma de grandes paredões de rocha nua (Pedra do Calembá, Pedra da Rosilha, Morro do Inácio, dentre muitos outros) ou formando extensos campos de matacões pouco ou nada movimentados. Quatro fácies são individualizadas: média-homogênea, dominante em termos de área, bandada, pegmatítica e hololeucocrática todas de composição tipicamente granítica.
- Coberturas Cenozoicas (*aluvões, dunas e aterros*) - Os depósitos aluvionares são constituídos de areias e cascalhos, com camadas subordinadas de argilitos de planície de inundação e meandros abandonados. As areias são quartzosas ou quartzo-feldspáticas, dependendo do grau de retrabalhamento e posição em relação às áreas serranas. A cobertura sedimentar do Pleistoceno ao Holoceno é caracterizada por sedimentos associados a vários ambientes costeiros e fluviais, que ocorrem interdigitados na Barra da Tijuca/Baixada de Jacarepaguá e ao redor da Baía de Guanabara. São sedimentos marinhos e continentais onde predominam areias e, subordinadamente, siltes e argilas e raramente cascalhos (Ponçano, 1976 *apud* CPRM/UERJ (2012)). Cobrindo a planícies costeiras, ocorre um conjunto de sedimentos pleistocênicos e holocênicos, dispostos em mangues, dunas, praias e planícies aluvionares.

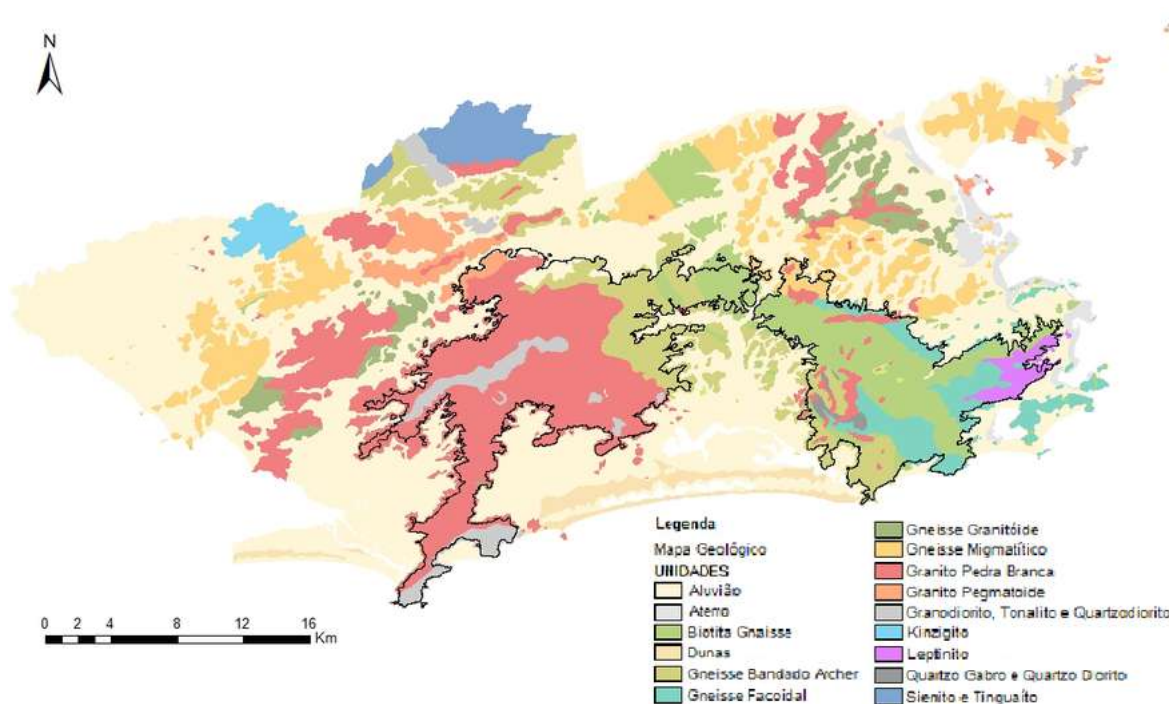


Figura 3 – Mapa geológico do município do Rio de Janeiro mostrando principais litologias e o contorno dos maciços da Tijuca e da Pedra Branca.

Fundação Geo-Rio

3.3 Geomorfologia

Embora os eventos tectônicos tenham sido os principais processos geradores do relevo, os intervalos de relativa calma tectônica entre eles foram fundamentais para que as forças erosivas ou denudacionais esculpisse o relevo nas distintas condições climáticas reinantes. De maneira geral, a alternância entre eventos tectônicos e fases de quiescências, durante o Mesozóico e o Paleógeno, bem como neotectônicos, a partir do Neógeno (23.5 Ma. até os dias atuais), culminou no que hoje compõe a paisagem da porção costeira do sul e sudeste do Brasil (CPRM/UERJ, op.cit.). Ruellan (1944) *apud* (CPRM/UERJ, op.cit.) a respeito da evolução geomorfológica na Baía da Guanabara e adjacências, caracterizou as escarpas das serras do Mar e da Mantiqueira como frentes dissecadas de blocos falhados e basculados para norte. Neste contexto o domínio dos maciços litorâneos representaria o último degrau emerso desta série de blocos.

Geomorfologicamente o MPB está inserido no domínio geomorfológico dos maciços litorâneos do estado do Rio de Janeiro. Apresenta altitudes variadas, partindo de 50 m e até o ponto culminante do município do Rio de Janeiro (Pico da Pedra Branca - 1025 m) e vertentes escarpadas, recobertas por um manto coluvionar de espessuras variadas, representando um domínio serrano derivado de blocos falhados e basculados. Suas encostas são menos escarpadas do que as do maciço da Tijuca, porém mais entalhadas do que as do Gericinó- Mendanha, diferenciadas morfológica-

mente pela litologia e estrutura própria de cada um. No maciço da Pedra Branca as escarpas existem em menor quantidade e são responsáveis pela formação de diversas serras e vales, quase todos de natureza estrutural, que se destacam na paisagem através de lineamentos marcantes de direção predominante N 50-60 E e E-W (Costa, 2002a *apud* Costa, 2006).

Ainda de acordo com Costa (op. cit.), seu relevo é de moderado a fortemente escarpado, formado por de encostas convexas a retilíneas e vales em forma de “V” (típicos de calhas fluviais esculpidas em áreas montanhosas), com suas vertentes predominantemente simétricas, indicando uma relação de “equilíbrio” entre o entalhamento e o alargamento do vale, condicionado pelas características litológicas e estruturais da região.

3.4 Clima

Segundo Costa (2006), a classificação de Köppen para os maciços litorâneos da cidade do Rio de Janeiro define a predominância de três tipos climáticos: Aw (clima tropical quente e úmido com a presença de uma estação seca), Am (clima de bosque chuvoso) e Cf (clima subtropical úmido ou tropical de altitude). O primeiro, corresponde à franja de entorno dos maciços marcada pela presença das baixadas, principalmente a interiorana, onde a influência das massas marítimas é menor. O segundo e o terceiro, aparecem de forma conjugada, nas porções mais internas dos maciços, sendo o tropical de altitude, identificado nas regiões de cota altimétrica acima de 500 m.

De acordo com Serra & Ratisbona (1957) e Serra (1970) *apud* Dereczynski, Oliveira e Machado (2009), os totais pluviométricos anuais sofrem elevação de 1200 mm junto ao litoral da Zona Sul da cidade até 1600 mm à barlavento do maciço da Tijuca. A partir deste máximo a precipitação diminui, chegando a 1000 mm na Zona Norte. Um segundo máximo de 1400 mm no extremo norte da cidade é observado próximo ao maciço Gericinó-Mendanha. Nas demais áreas da cidade a precipitação anual oscila entre 1200 e 1400 mm. Em janeiro, a precipitação é maior no extremo norte da cidade, chegando a 200 mm próximo ao maciço Gericinó-Mendanha, decai gradativamente em direção ao interior da cidade, com mínimo de 120 mm na Zona Norte e a partir daí se eleva até o litoral da Zona Sul, onde a precipitação chega a 160 mm. Em julho, nota-se uma redução gradativa da precipitação, oscilando entre 100 mm na Zona Sul até 20 mm no extremo norte do município. Tais análises foram elaboradas considerando-se dados observacionais em 20 estações meteorológicas distribuídas de forma insatisfatória, com a maior parte no norte da cidade, somente a zona sul da cidade possuindo estações no litoral e sem qualquer posto na baixada de Jacarepaguá e nos maciços.

A figura 4, retirada de Dereczynski *et al.* (op. cit.) a distribuição espacial da precipitação média anual (1997-2006) sobre a cidade do Rio de Janeiro. Os três máximos de precipitação observados estão associados às três serras existentes na cidade: Carioca (no sudeste da cidade), onde se localiza a estação Sumaré, Mendanha (no norte da cidade) e Serra de Guaratiba (no sudoeste da cidade), próximo à estação da Grotta Funda. Nas áreas de planície a precipitação é sempre inferior aos totais observados junto às serras mencionadas, destacando-se um mínimo de precipitação no extremo norte da cidade, onde se localizam as estações Irajá e Penha.

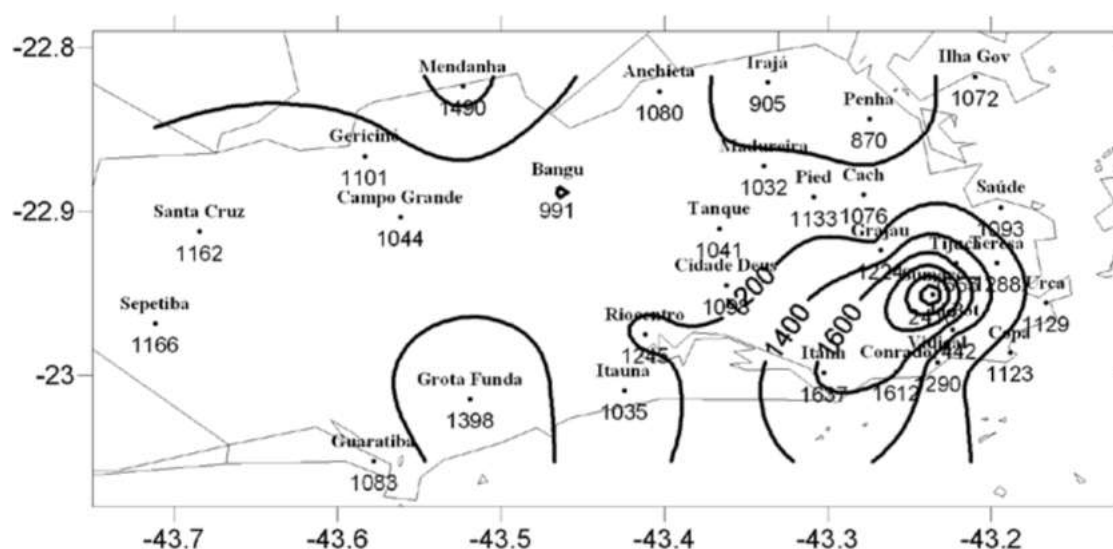


Figura 4 – Isoietas mostrando a precipitação média anual no município do Rio - Fonte: Derezynski et al. 2009

O gráfico as seguir (figura 5) mostra a evolução anual entre os anos de 1997-2006 das médias mensais de precipitação para algumas estações pluviométricas do município do Rio, duas das quais (Grota Funda e Santa Cruz), são representativas das médias esperadas para a área do MPB.

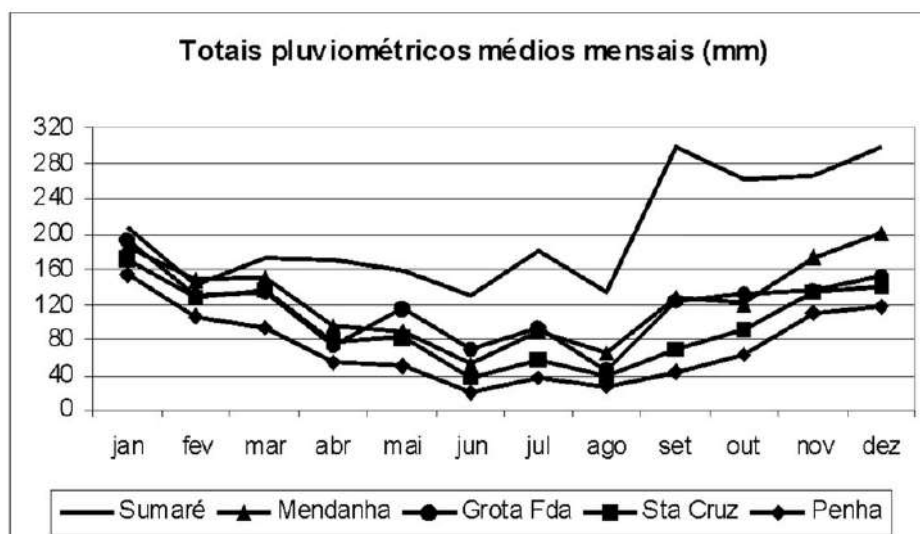


Figura 5 – Precipitação mensal em algumas estações meteorológicas do município - Fonte: Dereczynski et al. 2009

3.5 Ocupação Humana

A descrição da história de ocupação humana pretérita e presente a seguir foi extraída do trabalho de Costa (2006).

Na década de 1950, havia muitas lavouras, cuja produção escoava com a ajuda de animais, principalmente na localidade do Rio da Prata:

“... transporte usado pelo sitiante da serra, nessa zona: desde as primeiras horas da manhã assiste-se ao desfilar de tropas em pequenos grupos de três a quatro mulas, descendo a serra com jacás e caixotes, carregados de frutas, ou de outros produtos destinados à venda.” (p. 74).

OLIVEIRA (1960) apud Costa, op.cit.

Ainda hoje, pequenos sítiantes têm a sua produção (agricultura de subsistência ou áreas de pastagem de gado e cavalo) nas encostas do maciço da Pedra Branca, fazendo uso intensivo das trilhas e caminhos, transitando nelas com burros e cavalos de tração. Nas encostas mais suaves do maciço e nas áreas de baixada, próximas, principalmente nas localidades de Vargem Grande, Vargem Pequena, Ilha de Guaratiba, Guaratiba e Campo Grande, há a presença de pequenos sítiantes e pequenos lotes, alguns sobrevivendo da plantação de banana, outros transformados em haras, parques de lazer ou casas de festa, quando não são subdivididas em pequenas propriedades e casas de veraneio. Recentemente a tese de doutorado de COSTA (op. cit.) apresentou o monitoramento ambiental do uso do solo usando ferramentas de geoprocessamento. Nela, foram analisadas as principais alterações quanto ao avanço e/ou recuo da cobertura florestal, no período de 1992 a 1996, tendo como produtos seis mapas

digitais. Os resultados obtidos permitiram concluir que a floresta, apesar de representar 43% de todo o uso em 1996, apresentou uma redução de 25% da área ocupada instalando-se em seu lugar, o capim e a macega.

Atualmente, é na vertente norte do MPB onde a ocupação humana ocorre de maneira mais expressiva e pressiona intensamente os remanescentes florestais do maciço. É sobre as áreas desmatadas para introdução da pecuária extensiva que essa ocupação encontra maior facilidade de se estabelecer. Os espaços tomados pelo capim colônio têm sido alvos da expansão e introdução de novas residências. A mesma avaliação destaca que as áreas mais afetadas pela perda da mata estão localizadas nas vertentes norte, nordeste e noroeste, voltadas para as baixadas interioranas de Campo Grande, Senador Camará, Bangu e Realengo. As áreas mais preservadas estão nas encostas mais elevadas da vertente leste, principalmente no entorno do açude do Camorim. As principais razões para o deflorestamento foram o avanço da população pela ocupação desordenada, as queimadas intencionais (associadas ao avanço das pastagens) e as acidentais e o aumento dos cultivos de banana, particularmente na média/alta encosta dos principais vales. Este mesmo cultivo, em muitos casos, retraiu-se e deu lugar ao retorno (recuperação) da floresta, principalmente no vale do Rio Grande.

Segundo a autora, o processo de destruição da floresta continua a ocorrer. Foram registrados 5.958 ha de floresta, em 2004, para todo o maciço da Pedra Branca. As áreas de capim/campo totalizaram 4.299 ha. Outros tipos de uso, a exemplo das áreas cultivadas (principalmente com banana) e as de macega (capim alto e seco), estendem-se, respectivamente, por 2.357 ha e 2.736 ha.

4 Metodologia

4.1 Fonte dos Dados e Critérios de Escolha das Ocorrências

A metodologia utilizada teve início com a triagem de 73 laudos de vistoria de-correntes de escorregamentos exclusivamente associados a eventos pluviométricos significativos (EPS), produzidos pela Fundação Geo-Rio durante os anos de 2010 a 2015 e relativos à área do Maciço da Pedra Branca. O período em questão foi adotado porque a Fundação concedeu acesso à base de dados referente a esses anos. Segundo D’Orsi et al. (2013), um EPS é uma chuva com elevado potencial para deflagrar acidentes geológico-geotécnicos nas encostas. Para tal, no sistema Alerta Rio a Fundação Geo-Rio estabeleceu critérios para se definir um EPS a partir de eventos chuvosos que ocorrem na cidade. Estes eventos são definidos de maneira diferente segundo as macrobacias hidrográficas do município, conforme mostrado no quadro 3.

Macrobacia Hidrográfica	Precipitação		
	Maior ou igual a 10mm/h	Maior ou igual a 20 mm/h	Maior ou igual a 40mm/h
Baía de Guanabara	em pelo menos 5 estações pluviométricas	em pelo menos 2 estações pluviométricas	em pelo menos 1 estação pluviométricas
Zona Sul			
Jacarepaguá			
Baía de Sepetiba			

Quadro 3 – Critérios para se classificar um EPS segundo medições nas estações telepluviométricas do Sistema Alerta Rio nas macrobacias hidrográficas da cidade do Rio de Janeiro -

Fonte: ALERTA RIO. Relatório GEO-RIO/DEP/GPE – Nº 10/2012

Segundo o relatório de correlação entre chuvas e escorregamentos para a cidade do Rio de Janeiro de 2010 (D’ORSI et al., 2012) , os momentos inicial e final de um EPS são determinados segundo os seguintes critérios:

- O início do evento pluviométrico é determinado quando o acumulado pluviométrico em uma hora for maior ou igual a 1mm/h, para cada estação.
- O fim do E.P.S. é determinado quando o acumulado pluviométrico em uma hora for inferior ou igual a 1mm/h e houver a permanência dessa condição por no mínimo 6h (seis horas), para cada estação.

Os dados foram previamente selecionados para que estivessem relacionados a um EPS e estivessem localizados dentro da área de estudo. O objetivo da triagem

foi garantir que as ocorrências analisadas neste trabalho tivessem necessariamente a componente pluviométrica associada à deflagração dos movimentos. Os laudos foram analisados e eventos que não tivessem relevância para esta pesquisa (laudos relacionados a falhas estruturais em edificações, a vazamentos em tubulações de águas servidas, pluviais ou potáveis e apenas ao risco/possibilidade de ocorrência de eventos geotécnicos) foram excluídos, restando dos 73 laudos iniciais, os 68 que compõe a base de dados do presente trabalho. A respeito desta, existe a necessidade da continuidade das melhorias quanto à precisão da localização e da uniformidade da descrição das ocorrências, aspecto com o qual este trabalho busca contribuir. Muitos laudos possuíam coordenadas ligeiramente diferentes daquelas dos endereços descritos e alguns outros eram totalmente discrepantes. Apesar de os laudos conterem grande número de itens relacionados à geotecnia (bem como itens relacionados à questões habitacionais e humanas), muitos deles não foram totalmente preenchidos e não possuíam fotos claras que ilustrassem a ocorrência, e outros tantos carecem de registro fotográfico. De forma geral, pouca ênfase é dada à parte geológico-geotécnica, com a maioria das descrições centradas em aspectos estruturais de construções e à população atingida.

4.2 Espacialização dos Dados

A partir das informações contidas nos laudos a respeito dos eventos, tais como localização, tipologia de movimentos e os volumes mobilizados, um banco de dados em planilha Excel foi gerado. Para fins de tratamento, análise e espacialização das ocorrências, foram realizadas a verificação e a validação das coordenadas contidas nos laudos por meio dos programas ArcGis® e Google Earth. A verificação das coordenadas fez-se necessária pois por diversas vezes foram encontrados erros quanto à localização correta das ocorrências. Com as devidas correções foi gerado um mapa com a localização exata de cada ocorrência no maciço da Pedra Branca durante o período estudado.

4.3 Análise e Reclassificação de Tipologias

A análise das tipologias baseou-se na classificação adotada pela Fundação Geo-Rio (quadro 4), nas descrições e na documentação fotográfica contidas nos laudos. Foi conduzido um exame cuidadoso dos laudos em que se buscou determinar através das informações disponíveis o tipo de movimento e de material associados ao evento descrito, visto que a maioria das classificações de movimentos de massa na literatura (ver seção 2) consideram estes fatores como critérios de classificação.

Tipologia das Ocorrências		
Não se trata de ocorrência pertinente à GEORIO		0
Talude de Corte	Escorregamento de Solo	1
	Escorregamento de Solo / Rocha	2
	Escorregamento de Rocha	3
Ruptura de Aterro		4
Encosta Natural	Escorregamento de Solo	5
	Escorregamento de Solo / Rocha	6
	Escorregamento de Rocha	7
Queda / Rolamento de Blocos ou Lascas Rochosas		8
Escorregamento de Tálus		9
Ruptura de Estrutura de CONTENÇÃO		10
Escorregamento de Lixo / Entulho		11
Corrida		12
Processos Erosivos / Assoreamento		13
Ameaça		-

Quadro 4 – Classificação de Tipologias adotada pela Geo-Rio - Fonte: ALERTA RIO. Relatório GEO-RIO/DEP/GPE – Nº 10/2012.

Para fins de maior abrangência do estudo em questão decidiu-se pela reclassificação das tipologias para uma classificação de movimentos de massa que fosse internacionalmente aceita, no caso a classificação escolhida foi a de Varnes D.J. (1958), visto que a classificação da Fundação Geo-Rio atende às particularidades operacionais da prefeitura da Cidade do rio de Janeiro.

Foi necessário no entanto realizar adaptações na classificação de Varnes devido à dificuldade encontrada na identificação dos tipos de movimento e de material mobilizado tomando-se como base somente as informações dos laudos. Desta forma, foram acrescentados alguns termos mais gerais quando não havia certeza da tipologia associada a um determinado evento:

1) **Solo**: Quando não foi possível distinguir o tipo de movimento, mas apenas a natureza do material mobilizado

2) **Não identificado**: termo usado quando não foi possível fazer a identificação do tipo de movimento através da descrição apresentada nos laudos.

3) **Escorregamento de lixo / entulho**: Material antrópico comum nas comunidades susceptível a escorregamento. Presente na descrição de muitos laudos.

4.4 Produção de Mapas de Atributos Físicos

A produção dos mapas temáticos de atributos físicos foi realizada através do uso do modelo SRTM resolução trinta metros obtidos no site do *United States Geological Survey* (USGS) relativos ao município do Rio de Janeiro. Os mapas deste trabalho seguem todos a escala de 1:10.000 e foram criados usando o software ArcGIS® da Esri. ArcGIS® e ArcMap™ são propriedade intelectual da Esri e são usados aqui sob licença. Copyright© Esri.

4.4.1 Mapa de Inclinação

A ferramenta **slope** do ArcGis® tem como entradas um arquivo raster, a unidade de medida da saída (se em graus ou em percentual) e o fator de multiplicação z (definido como 1). A saída é um raster em que cada célula contém um valor único de inclinação, isto é, o arco-tangente da máxima variação de altitude pela distância horizontal entre um dado *pixel* e algum de seus oito vizinhos.

4.4.2 Mapas de Curvatura

No ambiente ArcGis® os mapas de curvatura de encosta foram produzidos através da função **curvature**, que tem como entradas um arquivo raster tipo DEM, o tipo de curvatura a ser analisado (se em plano, em perfil ou *standart*) e o fator de multiplicação do eixo z. O raster utilizado foi, como mencionado acima, obtido do site do USGS, as curvaturas em plano e em perfil foram escolhidas e o fator do eixo z definido como 1, uma vez que todas as coordenadas (x, y e z) utilizam o metro (m) como unidade de medida. As curvaturas em perfil são calculadas na direção de maior caimento do terreno e influenciam a aceleração e desaceleração de fluxos sobre a superfície. As curvaturas em plano são perpendiculares à direção de máxima declividade e indicam se a superfície tem tendência a concentrar fluxos (convergência) ou a não concentrar fluxos (divergência).

As saídas deste procedimento foram dois mapas do terreno, um representando as curvaturas em perfil e outro as curvaturas em plano, em que cada pixel contém um valor positivo ou negativo de diferentes magnitudes. No mapa das curvaturas em perfil o programa retorna um raster cujos pixels possuem valores positivos para perfis côncavos e negativos para perfis convexos. Já no mapa das curvaturas em plano, valores positivos indicam convexidade lateral da superfície e valores negativos concavidade lateral da mesma.

Através da ferramenta **extract values to points**, foi montada uma tabela com os valores respectivos das curvaturas em plano e em perfil para cada ponto, e o sinal

das curvaturas em plano foi invertido de forma que ambos valores de curvatura fossem positivos para morfologias côncavas e negativos para convexas. Essa convenção de sinais foi adotada com o fim de simplificação da compreensão dos dados, sem alterar a natureza deles. Os dados foram utilizados nesta forma nos testes de PCA (Análise de Componentes Principais).

Desta forma, foi gerada a seguinte tabela (quadro 5) que resume a nomenclatura adotada neste trabalho (X: curvaturas em plano; Y: curvaturas em perfil).

X	Y	Classificação Geométrica	Classificação Geomorfológica
0	0	Linear-Linear	Linear-Linear
+	+	Côncavo-Côncavo	Côncavo-Convergente
0	+	Linear-Côncavo	Côncavo-Linear
-	+	Convexo-Côncavo	Côncavo-Divergente
-	0	Convexo-Linear	Linear-Divergente
-	-	Convexo-Convexo	Convexo-Divergente
0	-	Linear-Convexo	Convexo-Linear
+	-	Côncavo-Convexo	Convexo-Convergente
+	0	Côncavo-Linear	Linear-Convergente

Quadro 5 – Nomenclatura adotada na classificação da geometria de encostas

4.4.3 Mapa de Orientação de Vertentes

Para a produção do mapa de orientação de vertentes há a ferramenta **surface aspect**, que recebe arquivos tipo TIN e conjunto de dados tipos terrain (conjunto de superfícies em formato *TIN*) ou LAS (formato de arquivo proveniente de LIDAR) e devolve uma superfície poligonal dividida em dez classes segundo o azimuth (orientação horizontal da vertente), às quais o programa atribui o seguinte código numérico (quadro 6):

Código	Orientação de Vertente	Setor Azimutal
-1	Plano	-
1	Norte	0° – 22.5°
2	Nordeste	22.5° – 67.5°
3	Leste	67.5° – 112.5°
4	Sudeste	112.5° – 157.5°
5	Sul	157.5° – 202.5°
6	Sudoeste	202.5° – 247.5°
7	Oeste	247.5° – 292.5°
8	Noroeste	292.5° – 337.5°
9	Norte	337.5° – 360°

Quadro 6 – Classificação de Orientações de Vertentes no ArcGis®

Para tanto foi necessária a criação de um arquivo TIN a partir da carta topográfica do município do Rio de Janeiro (um *shapefile* das curvas de nível do relevo) para ser utilizado como entrada, o que foi feito através da ferramenta **create TIN**.

4.4.4 Mapa de Lineamentos

O mapa de lineamentos foi produzido por fotointerpretação tomando-se como base o *hillshade* gerado a partir do arquivo SRTM. Utilizou-se a ferramenta **hillshade** para gerar diversos mapas com diferentes direções de incidência de luz, de forma a facilitar a identificação das feições lineares. As direções mais utilizadas foram NW, N, NE e E, sempre com a luz a uma altitude correspondente a um ângulo de 45° acima da linha do horizonte. Dessa forma, com o programa em modo de edição, foi criado um *shape contendo as* linhas correspondentes à interpretação das feições identificáveis no terreno.

4.4.5 Mapa de Densidade de Lineamentos

A densidade de lineamentos foi calculada usando-se a ferramenta **line density** e o mapa de lineamentos como entrada, no que foi determinado um tamanho de célula equivalente ao do SRTM (30m) e um raio de busca de 800m. A definição deste valor de raio se deu a partir da análise de histogramas da frequência de ocorrências pelas distâncias ao lineamento mais próximo, em que se constatou que todas as ocorrências estavam compreendidas dentro do intervalo de 800m, sendo, portanto, este um limiar de distância razoável na determinação da densidade de lineamentos. O cálculo das distâncias individuais de cada ocorrência até o lineamento mais próximo foi feito através da ferramenta **near**.

4.5 Cruzamento dos Dados e Estatísticas Preliminares

Após a etapa da produção dos mapas de atributos físicos, seguiu-se a extração das informações dos mapas para os pontos relativos a cada ocorrência de movimento de massa, conjugando-se assim a posição geográfica com seus atributos físicos correspondentes. Para isso foi usada a ferramenta ***extract values to points***, que gera uma tabela com os valores dos atributos associados à localização de cada ponto. Além dos mapas de atributos previamente descritos, outros mapas foram utilizados na produção da base de dados de cada ocorrência: mapas geológicos (litologia), geológico-geotécnicos e de uso do solo foram cedidos pela Fundação Geo-Rio e somados à base de dados. Além disso dados de pluviometria, tais como chuva diária e acumulada, datas e hora de começo e término dos EPS e o momento em que aconteceram as ocorrências, o grau de confiabilidade dos dados, bem como o volume mobilizado em cada evento (descrito nos laudos), todos compuseram a base de dados. Desta forma foi montada uma tabela contendo todas as ocorrências e os dados a elas relacionados.

Procedeu-se então à análise dos dados, em que foram feitas as estatísticas individuais para cada parâmetro associado às ocorrências, isto é, a distribuição percentual ou absoluta das ocorrências segundo as classes do atributo considerado (capítulo 5).

O próximo passo era buscar possíveis correlações entre atributos (ver resultados na seção 5.6), em que foram exploradas algumas combinações cujas variáveis são correlacionáveis e geologicamente relevantes e coerentes (seção 2.2), análise que nesta etapa se limitou a um espaço tridimensional (máximo de três variáveis por vez) devido à complexidade de compreensão e de representação em plano de um problema multidimensional. Foi montada uma tabela de combinações possíveis de atributos (quadro 7), tendo sido testadas aquelas combinações que julgou-se possuírem coerência geológica e selecionadas aquelas que apresentaram as correlações ou tendências mais claras, que de alguma forma contribuíram para a compreensão e apontavam caminhos para a continuidade da investigação.

	TIPOLOGIA	AZIMUTE	DENSIDADE	DISTÂNCIA	GEOMORFO	USO	LITOL	GEOTEC
VOLUME								
GEOTEC								
LITOL								
USO								
GEOMORFO								
DISTÂNCIA								
DENSIDADE								
AZIMUTE								

	Combinações selecionadas
	Combinações descartadas
	Combinações não selecionadas

Quadro 7 – Tabela de combinações de atributos

Algumas combinações foram descartadas *a priori*, ou porque julgou-se não possuírem correlação entre si. A variável “inclinação” foi retirada da análise, assunto abordado na seção 5.3.3. As demais foram testadas e as selecionadas serão apresentadas na seção 5.6.

4.6 Análise de Componentes Principais (PCA)

Devido à multidimensionalidade do problema, a simples análise em pares ou trios de variáveis (atributos do meio físico) é insuficiente para identificar todas as possíveis inter-relações estabelecidas entre elas. O método do PCA foi escolhido para lidar com essa complexidade. Para tal, dezenas de testes com combinações variadas foram rodados utilizando-se o programa R (R Development Core Team, 2008), um *software* gratuito para a computação de dados estatísticos e gráficos e obedecendo aos seguintes passos:

- 1) Todas as variáveis quantitativas de cada ocorrência (concavidades em plano e em perfil, orientação de vertente, densidade de lineamentos e distância de lineamentos) formam a entrada do primeiro teste de componentes principais (a variável “inclinação” foi retirada da análise);
- 2) O peso de cada uma das variáveis é calculado para cada uma das componentes principais;
- 3) A soma dos módulos dos pesos de cada variável para as duas primeiras componentes principais foi escalada numa ordem de importância em que quanto maior o peso, maior a importância e vice-versa;

- 4) Retira-se a variável de menor importância e novo PCA é rodado repetindo-se os passos 2 a 4;
- 5) Ao fim deste processo iterativo obtiveram-se quatro variáveis de pesos semelhantes, simplificando o problema e aumentando a precisão do método;
- 6) Novos testes de PCA são rodados, agora tomando como critérios para a seleção de conjuntos de ocorrências os atributos qualitativos (que não podem ser incluídos nos testes de PCA propriamente ditos), desde que haja para cada conjunto um número mínimo de 20 observações;
- 7) Exame dos resultados para fins de verificação da coerência geológica.

Ao fim deste processo foram selecionados os testes que apresentaram melhores resultados, isto é, cuja soma da variância das componentes 1 e 2 fosse a maior possível. Sobre estes resultados foram levantadas hipóteses e são apresentadas na seção 5.7 do capítulo a seguir.

5 Resultados e Discussão

5.1 Mapas de Apoio (Espacialização e Atributos Físicos)

5.1.1 Mapa das Ocorrências

A figura 6 é o produto da organização dos dados de latitude e longitude em planilhas e a sua projeção sobre um basemap (*world imagery*). Este recurso online está disponível na base de dados da Esri® no ArcGis.

Observando-se o mapa pode-se perceber que a maioria das ocorrências encontra-se na parte norte/nordeste do maciço, onde existe maior ocupação humana e consequentemente maior alteração antrópica do meio natural. Além disso, quando se observa o mapa geológico do município, esta mesma parte do maciço é predominantemente constituída por gnaisses, já sugerindo dois fatores que agem na deflagração de movimentos de massa na área de estudo: uso do solo e litologia.

5.1.2 Mapa de Inclinação

O mapa de inclinação do Maciço da Pedra Branca (figura 7) mostra o relevo montanhoso da área em categorias de 7.2° em 7.2° , desde 0° até 70.9° de inclinação.

5.1.3 Mapas de Curvatura de Encosta

Os mapas de curvatura de encosta (figuras 8 e 9) foram utilizados na classificação geomorfológica das encostas do maciço. Valores negativos no mapa de curvaturas em plano representam superfícies lateralmente côncavas, enquanto que no mapa de curvaturas em perfil valores negativos representam superfícies verticalmente convexas. O resultado do cruzamento de dados entre os mapas de curvatura e a localização das ocorrências foi disposto em forma de gráficos de dispersão e de barras (seção 5.3.1).

5.1.4 Mapa de Orientação de Vertentes

O mapa de orientação de vertentes (figura 10) mostra as direções de maior caimento das vertentes classificadas em setores circulares de 45° cada, segundo as nove direções cardeais. Sobre a relevância deste mapa pode-se dizer que a orientação de vertentes pode ter papel decisivo na deflagração de movimentos de massa, uma vez que influenciam tanto na ocorrência de chuvas orográficas quanto nos padrões de corte da litologia, ocasionalmente coincidindo com planos de fraqueza que podem

tornar uma face da encosta muito mais susceptível a escorregamentos que uma outra vizinha.

5.1.5 Mapa de Lineamentos

Lineamentos são feições lineares de uma superfície mapeável com forma retilínea ou ligeiramente curva, que diferem das feições adjacentes e refletem provavelmente estruturas de subsuperfície (O'LEARY; FRIEDMAN; POHN, 1976). Os lineamentos, presumivelmente, refletem fenômenos de sub-superfície associados com o movimento diferencial de blocos falhados (ANDRADES FILHO; FONSECA, 2009). O interesse no seu mapeamento, levando em consideração as definições anteriores, está em que os lineamentos podem ser interpretados como zonas de fraqueza possivelmente relacionadas à deflagração de escorregamentos.

A figura 11 mostra os lineamentos fotointerpretados na área de estudo, mostrando predominância de *strikes* nas direções NE-SW e NW-SE, com uma outra família subordinada de lineamentos de direção E-W.

5.1.6 Mapa de Densidade de Lineamentos

Baseado no mapa anterior, a figura 12 mostra a densidade de lineamentos dividida em cinco classes. É possível notar que as áreas de maior densidade (tom mais escuro) se localizam predominantemente a nordeste da área de estudo, coincidindo com as localidades de ocorrência de gnaisses e de maior densidade populacional.

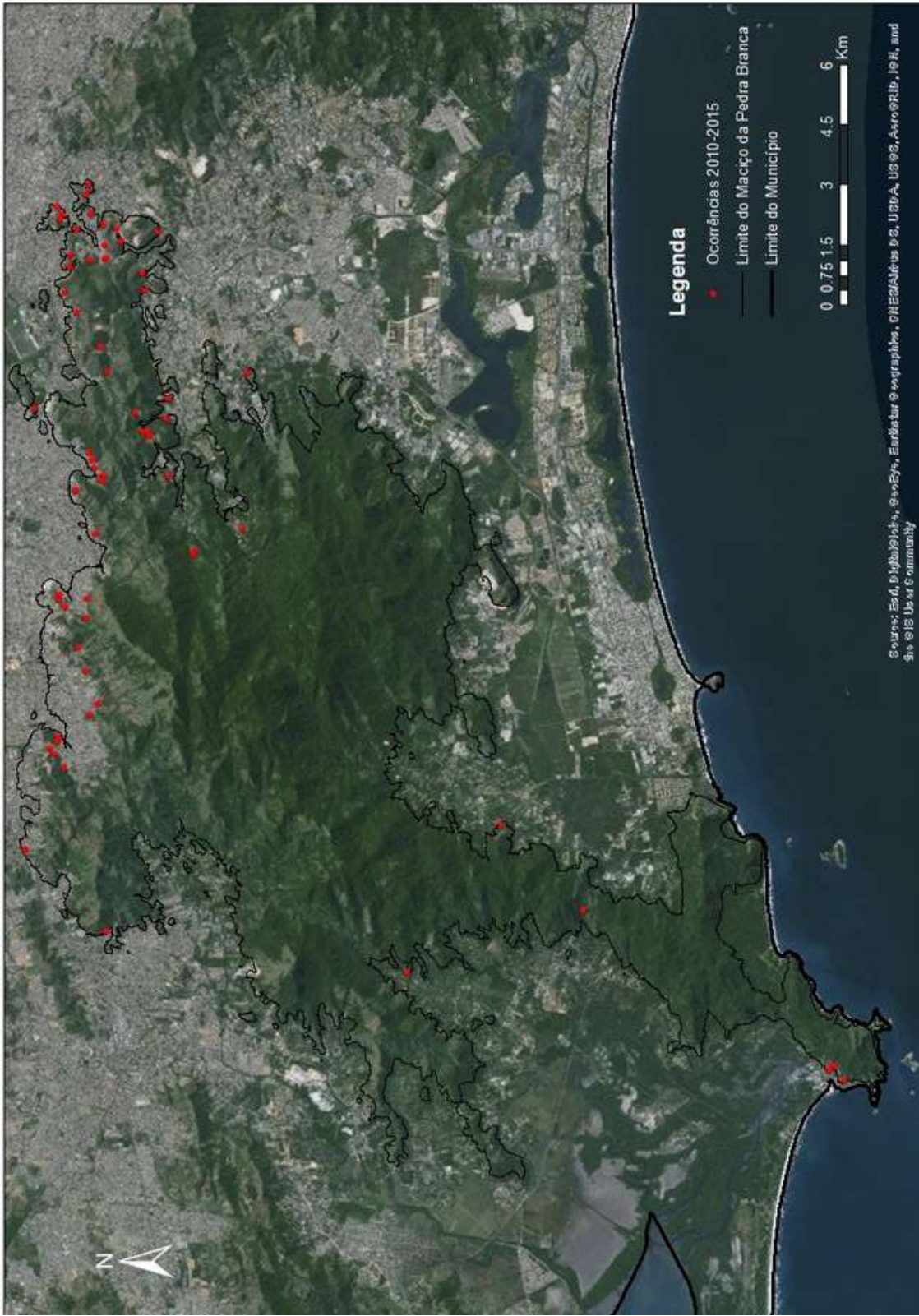


Figura 6 – Resultado da espacialização dos dados de localização das ocorrências contidas nos laudos - Google Earth®

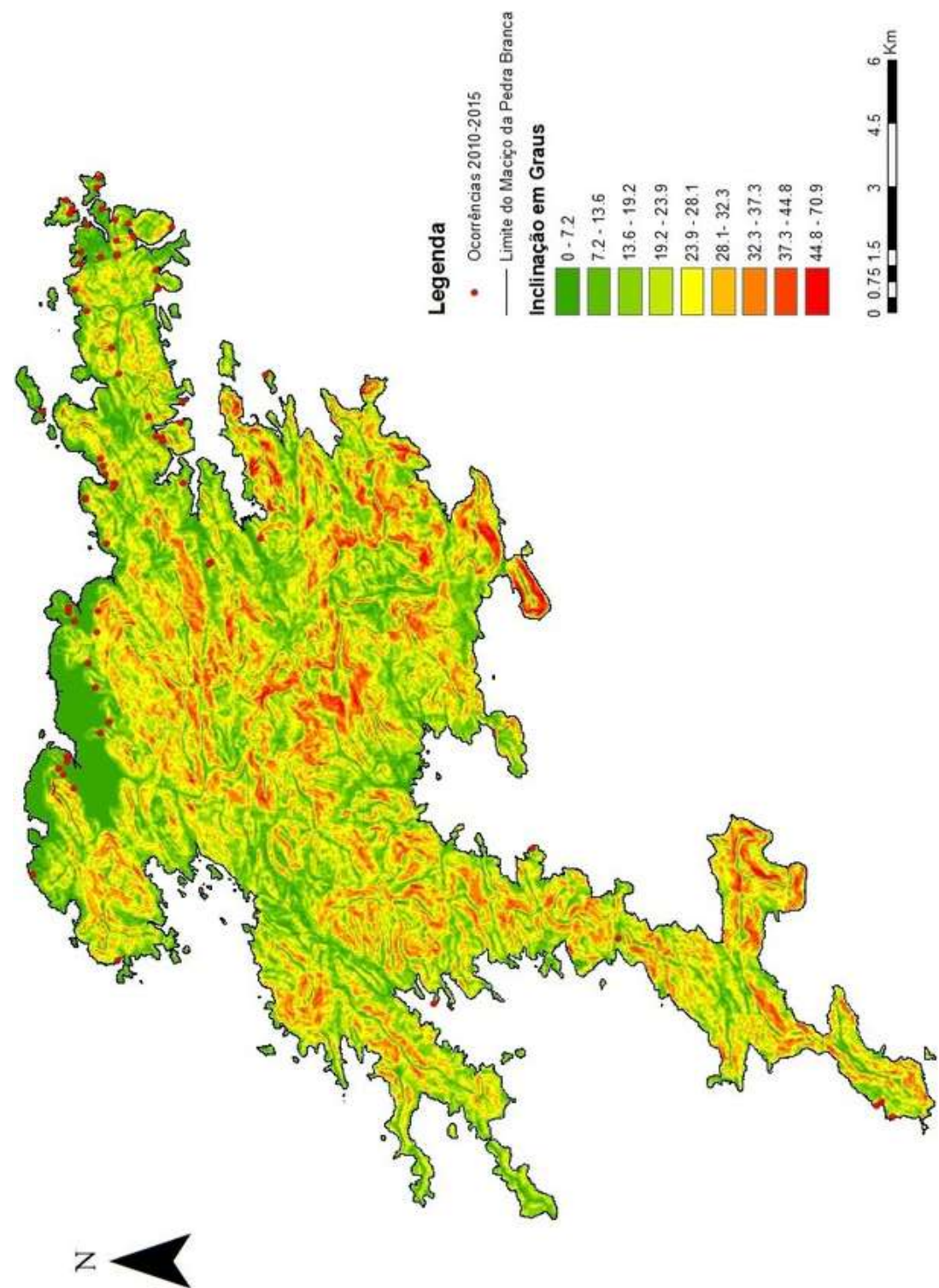


Figura 7 – Recorte mostrando a inclinação do relevo na área do MPB. Notar o relevo acidentado da área - ArcGis® 10.3

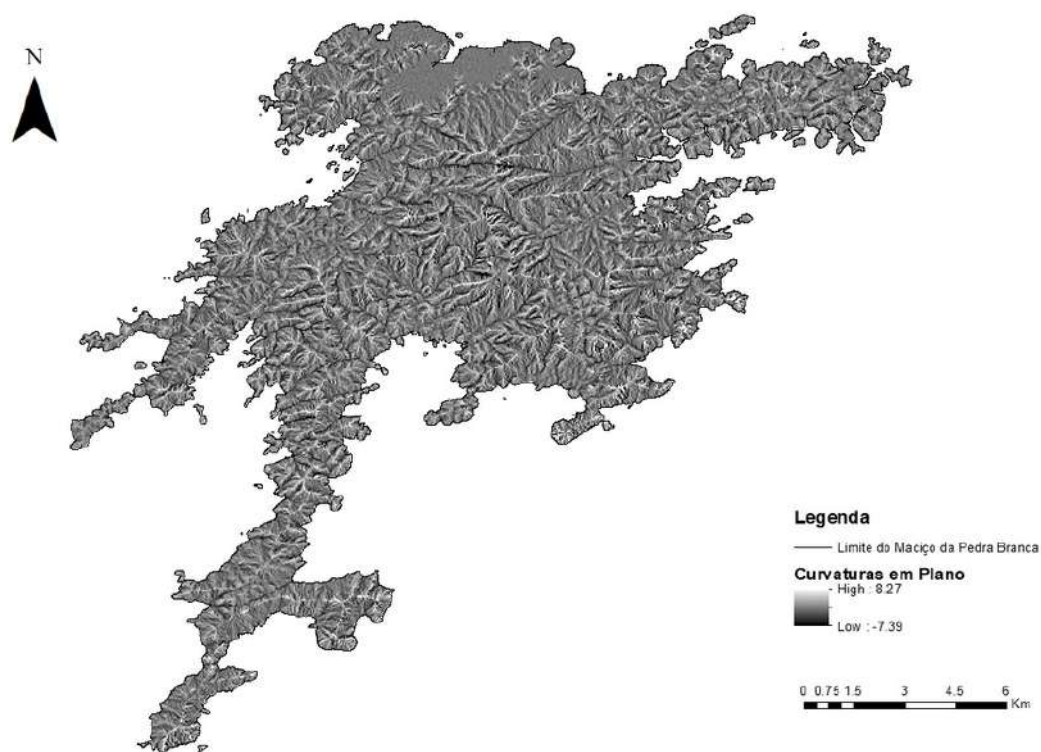


Figura 8 – Recorte da área mostrando a magnitude das curvaturas em plano

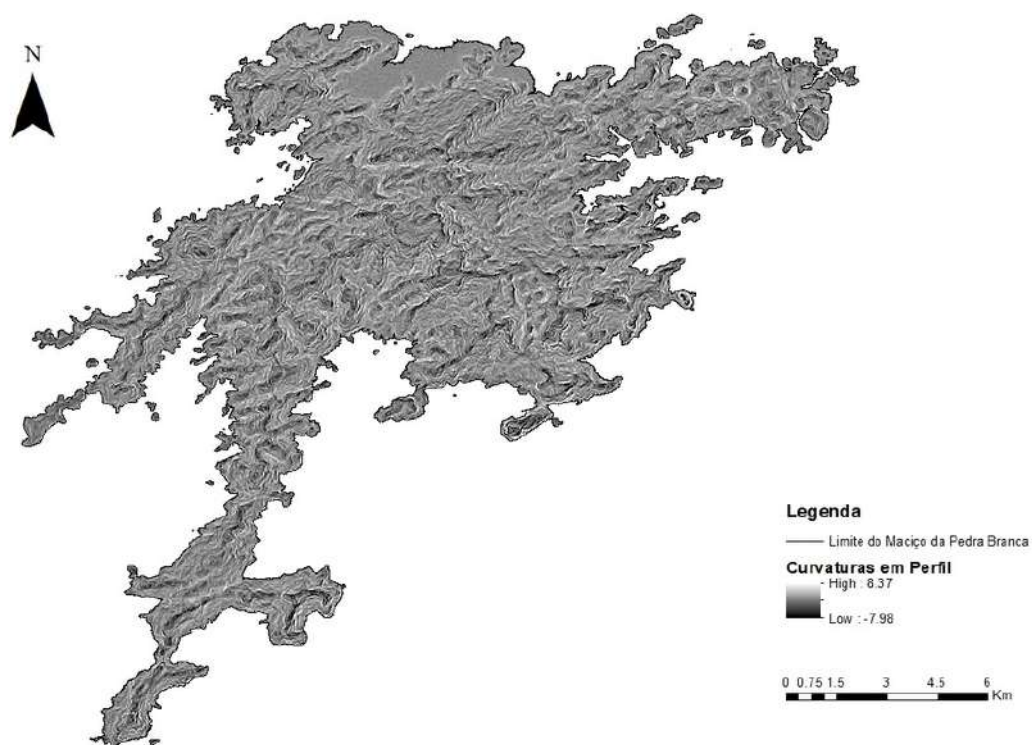


Figura 9 – Recorte da área mostrando a magnitude das curvaturas em perfil

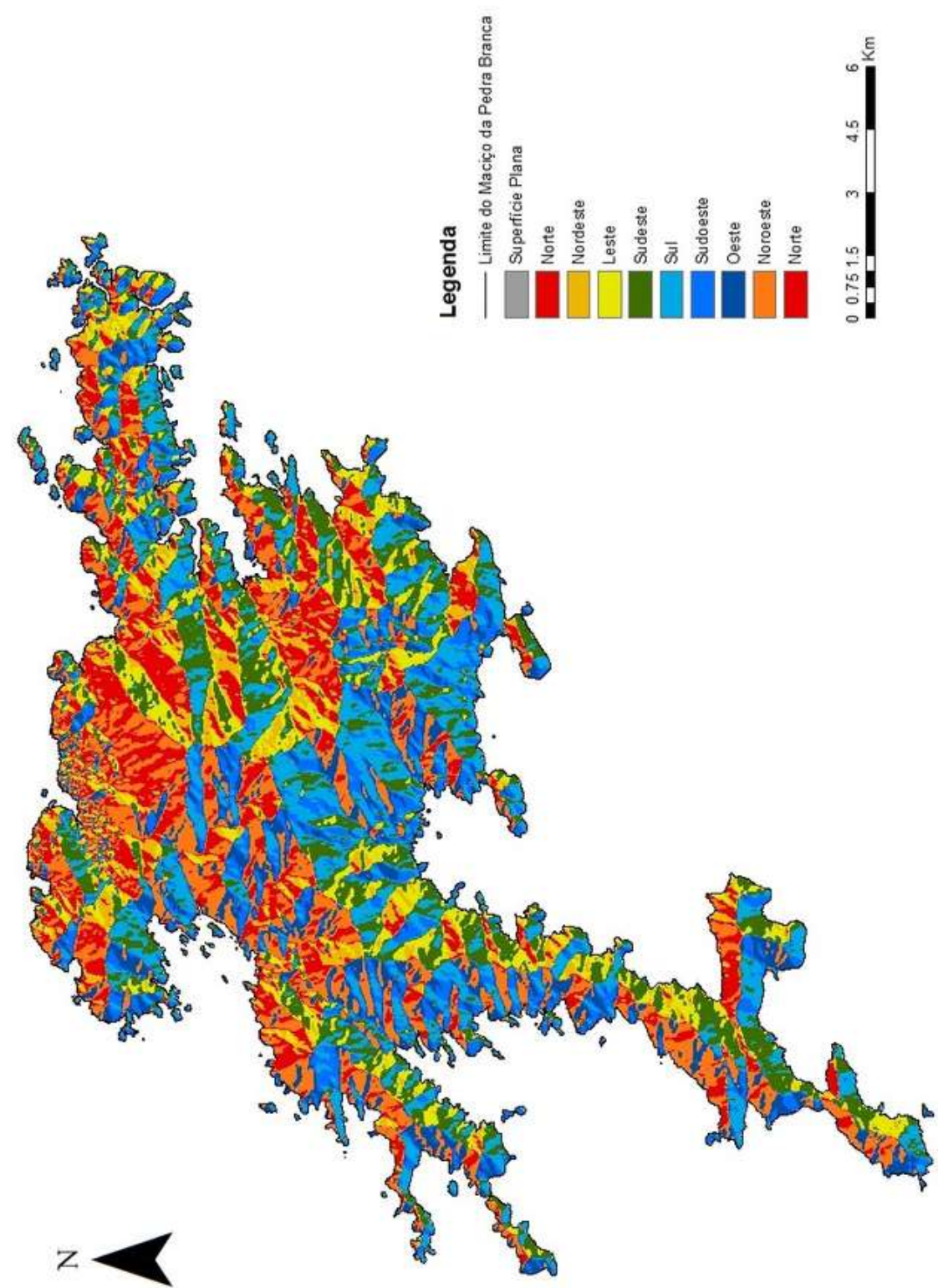


Figura 10 – Mapa do MPB mostrando a orientação das vertentes em direções cardinais

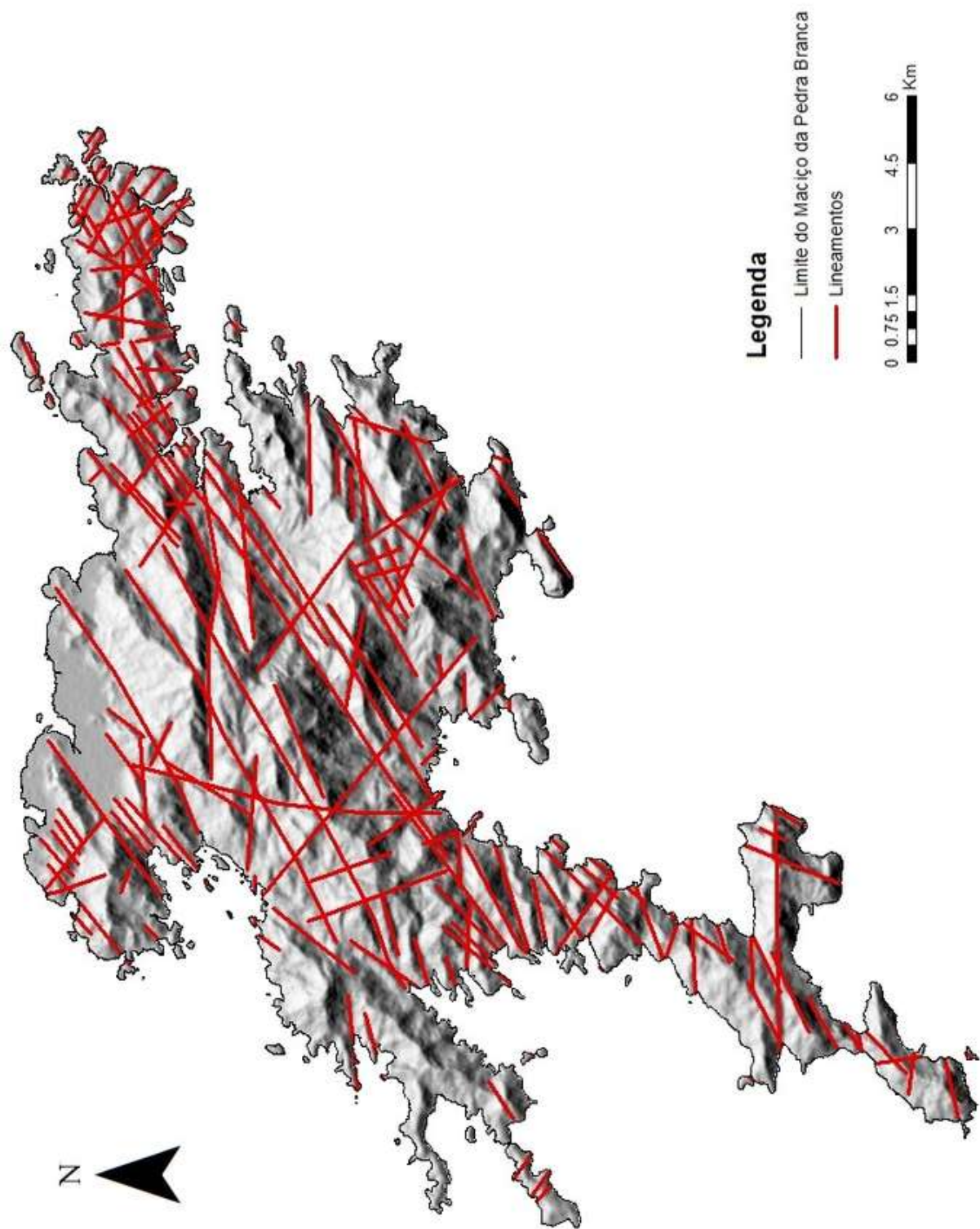


Figura 11 – Mapa de Lineamentos sobre o *Hillshade* utilizado na fotointerpretação

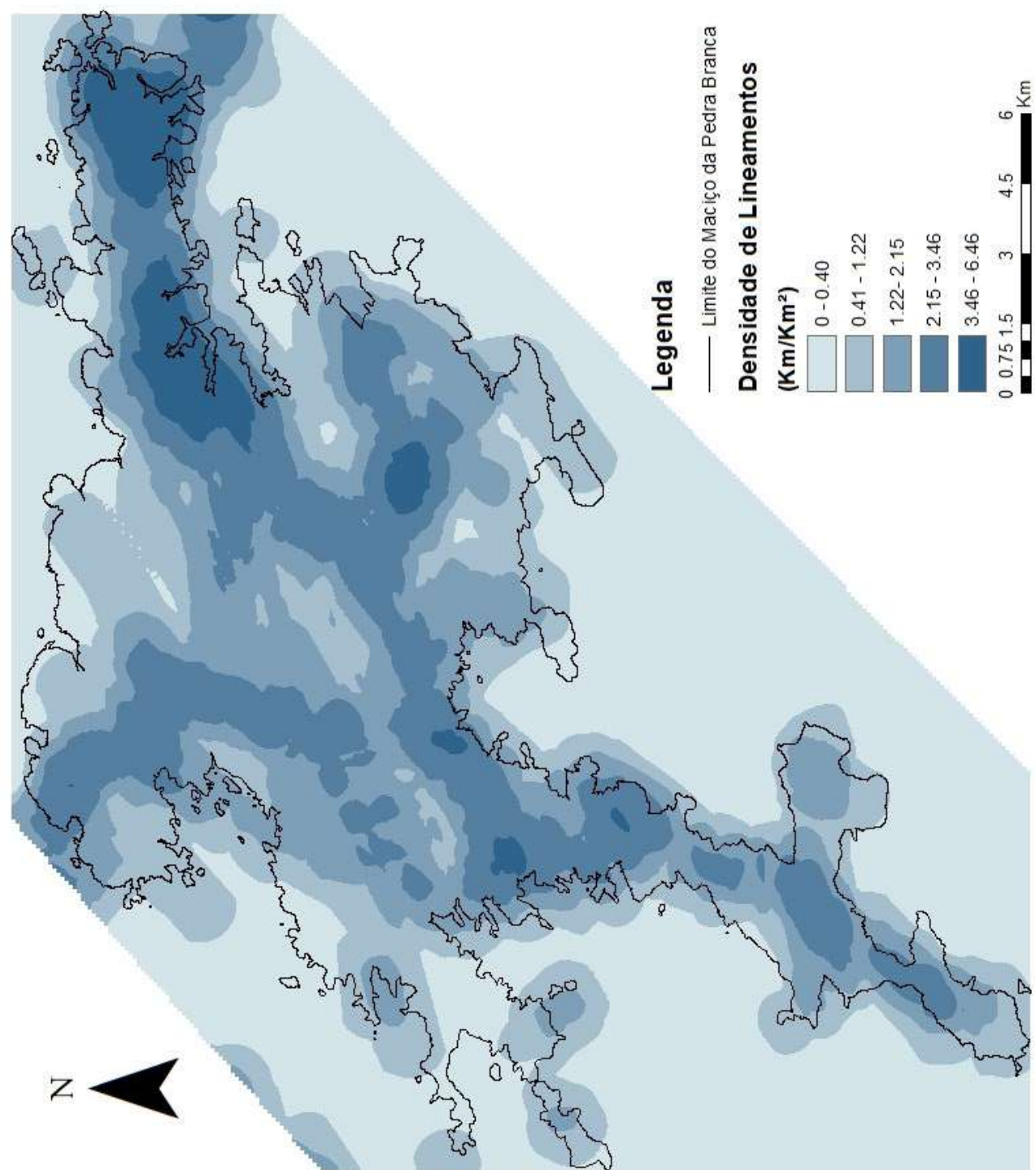


Figura 12 – Área do MPB com isolinhas das densidades dos lineamentos fotointerpretados

5.2 Ocorrências x Atributos Mecânicos

5.2.1 Volume Mobilizado

A análise de volume mobilizado baseou-se na classificação adotada pela Fundação Geo-Rio (D'ORSI et al., 2012), cujos dados foram obtidos diretamente dos laudos que possuíam dados a respeito do volume mobilizado na ocorrência. A distribuição percentual dos dados (figura 13) mostra uma clara tendência de correlação inversa entre o volume mobilizado e a frequência do evento, isto é, ocorrências de menor volume têm maior frequência e vice-versa. Ocorrências que mobilizam grandes volumes ($>100\text{m}^3$) são relativamente raras no Maciço da Pedra Branca.

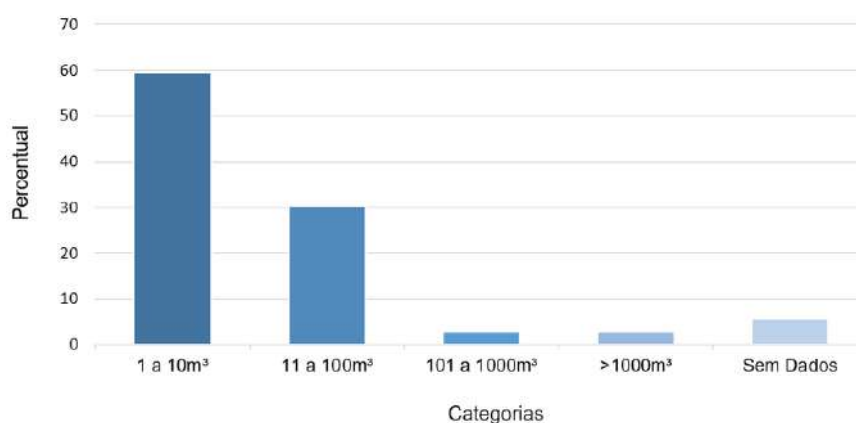


Figura 13 – Categorias de volume (solo, rocha e vegetação) mobilizados no período em análise

5.2.2 Tipologias de Movimento de Massa

Como nos laudos não há um item específico sobre tipologia de movimentos de massa, esta análise dependeu em grande medida das descrições redigidas pelos técnicos e pelo registro fotográfico. O gráfico abaixo (figura 14) mostra a frequência relativa de cada tipologia na área de estudo. Das tipologias Varnes propriamente ditas, “deslizamento translacional” é a mais comum, sendo seguida de “queda” e depois pelas tipologias “fluxo de detritos”, “complexo”, “deslizamento rotacional” e “deslizamento planar”, que somadas não alcançam 5% do percentual total. Das tipologias criadas para este trabalho, merecem destaque “solo”, que representa mais da metade dos eventos, e “não identificado”, que infelizmente detém uma parcela considerável do total de eventos. Percebe-se que a grande maioria dos eventos envolve exclusivamente solo como material mobilizado e que ocorrências com presença de rocha têm um papel subordinado. As novas categorias generalistas criadas contemplam somente o tipo de material mobilizado, inviabilizando análises mais conclusivas.

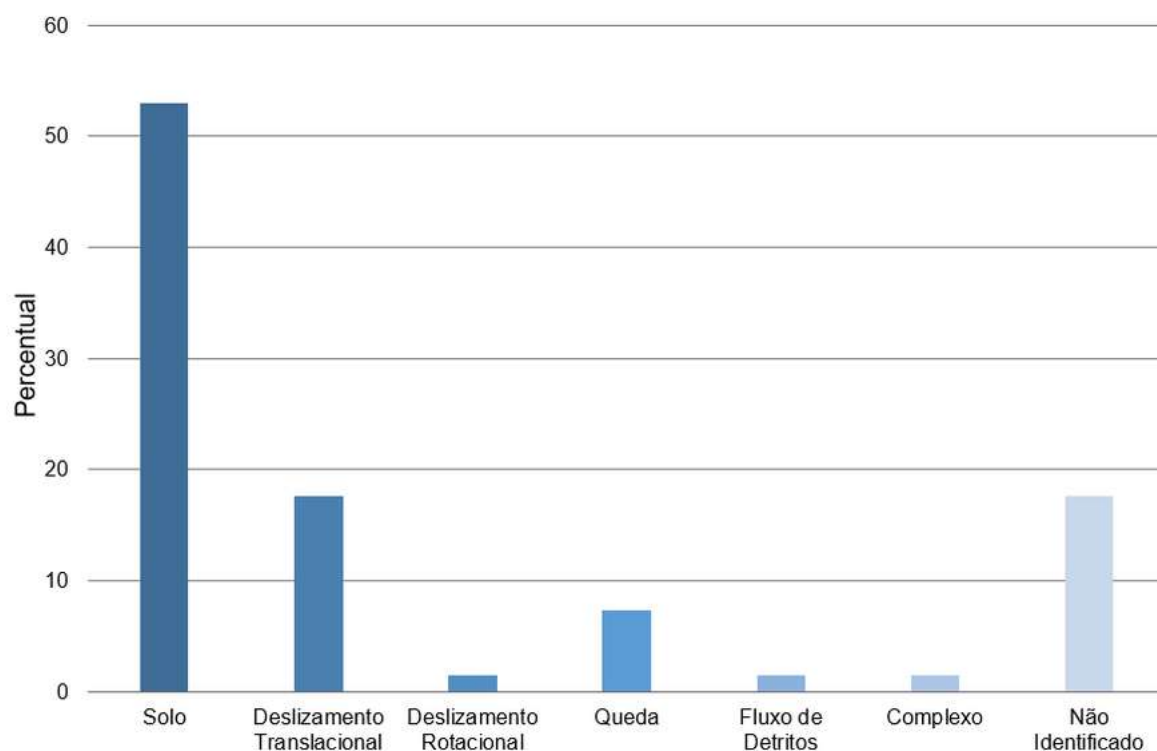


Figura 14 – Classificação das ocorrências segundo Varnes (modificada)

5.3 Ocorrências x Atributos Geomorfológicos

5.3.1 Geometria de Encosta

O gráfico de dispersão (figura 15) apresenta as ocorrências segundo dois atributos geométricos baseados respectivamente nos mapas de curvatura em plano (figura 8) e em perfil (figura 9). Nele, as superfícies côncavas foram consideradas positivas e as convexas, negativas. Cada quadrante representa uma categoria de geometria de encosta, que junto das regiões muito próximas aos eixos formam nove categorias no total, organizadas no quadro 5.

Quanto à distribuição das ocorrências, nota-se uma tendência a se localizarem na parte positiva do eixo das ordenadas (perfis côncavos), com concentração levemente maior na parte positiva do eixo das abcissas (curvaturas côncavas em planta). Algumas poucas ocorrências possuem ambos os valores negativos (convexo-convexo), e são raras as que apresentam curvatura em perfil negativa (convexa) e em plano positiva (côncava). Do exposto pode-se supor que perfis côncavos são os que mais favorecem a ocorrência de escorregamentos.

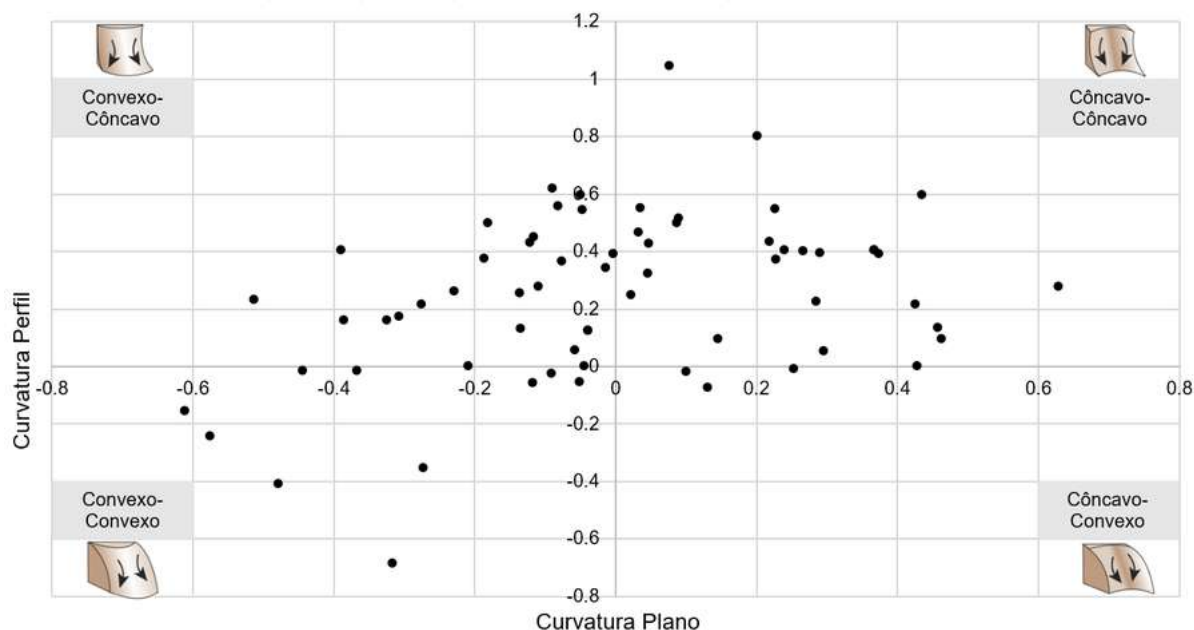


Figura 15 – Distribuição dos pontos segundo as curvaturas em plano e em perfil

O gráfico a seguir (figura 16) mostra as ocorrências classificadas segundo as categorias geométricas descritas anteriormente de maneira sintética, não considerando a magnitude das variáveis em questão e aplicando terminologia geomorfológica (convergência ou divergência de fluxos na superfície - quadro 5). Fica clara a maior concentração de ocorrências em geometrias de perfil côncavo.

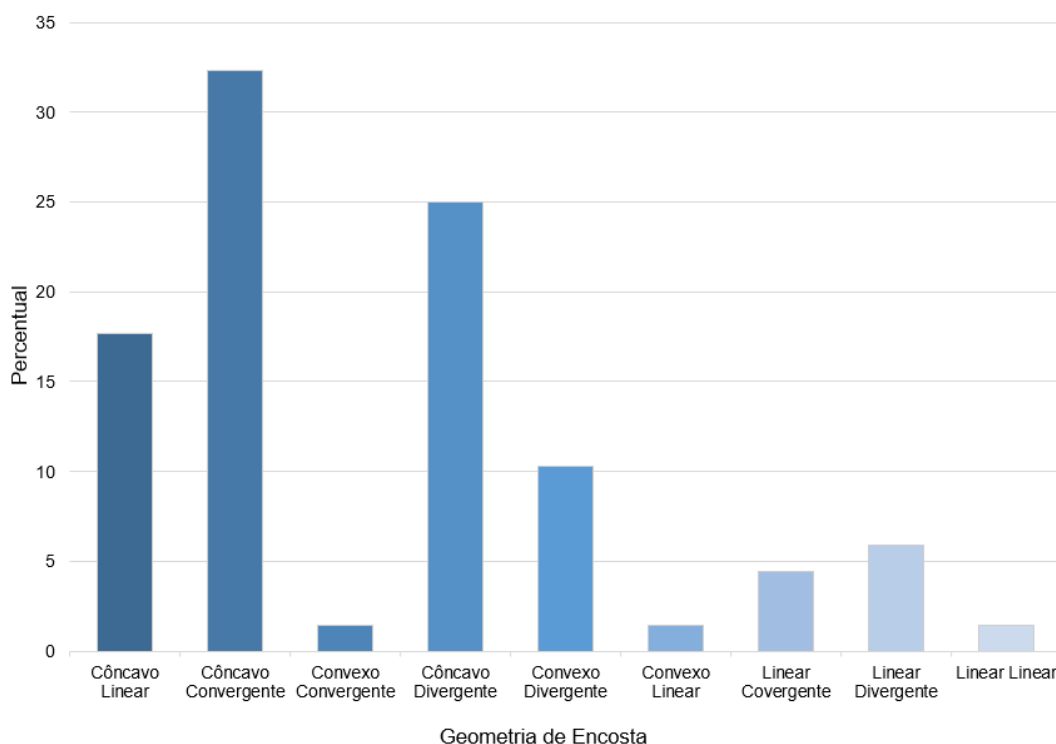


Figura 16 – Ocorrências distribuídas segundo a geometria do terreno

5.3.2 Orientação de Vertentes

O diagrama de rosetas (figura 17) foi produzido a partir do mapa de orientação de vertentes (figura 10) utilizando-se o *GrapherTM 12* (Golden Software, LLC) e mostra a distribuição das ocorrências segundo essa variável.

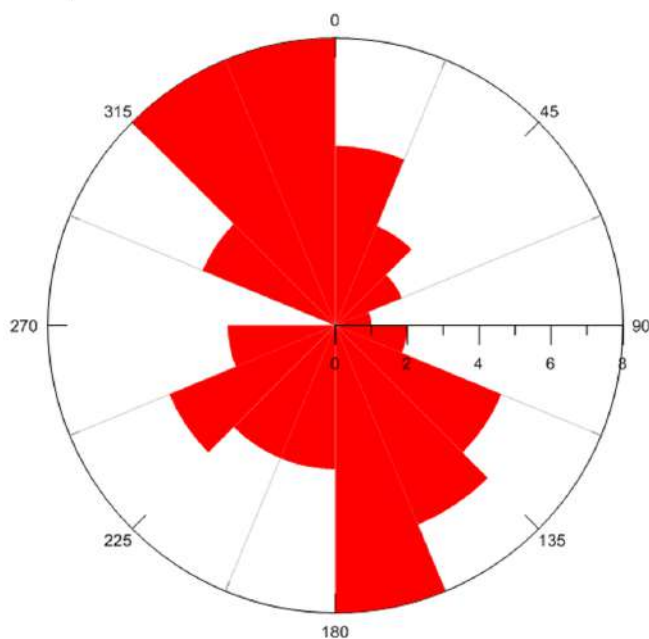


Figura 17 – Diagrama mostrando as frequências absolutas segundo o azimuth

Percebe-se claramente uma tendência de concentração de ocorrências nas direções N-S e NW-SE. Acredita-se que esse padrão possa ser reflexo do *trend* estrutural da área (NE-SW). Interpretado assim, o diagrama mostra basicamente que os escoamentos ocorrem nas encostas orientadas segundo as direções predominantes dos vales da área de estudo, isto é, vales com direção NE-SW flanqueados por vertentes de direções N-S e NW-SE. Por este mesmo motivo possuem maior representatividade em área e conseqüentemente maior chance de sofrerem ocupação humana. Pode-se argumentar que esta análise não traz nenhum fato novo, apenas reforça a dependência entre a geomorfologia e a geologia estrutural da área, sendo esta já contemplada por outras variáveis. No entanto pode-se especular que o maior número de eventos em SW que em NE pode ser um indicativo de eventos controlados pela relação entre a topografia e padrões atmosféricos de movimento de massas de ar (chuva orográfica), uma vez que as frentes frias que atuam sobre o estado costumam vir deste quadrante.

5.3.3 Inclinação

A figura 18 mostra a distribuição percentual das ocorrências segundo a inclinação do terreno. A princípio nota-se uma distribuição bimodal dos dados, mas logo vê-se

os pequenos valores de inclinação, que foram considerados baixos para produzirem instabilidade em solos residuais de gnaisses do Rio de Janeiro, cujos ângulos de atrito variam entre 27 e 35°, conforme dados obtidos em ensaios de cisalhamento direto por Maccarini (1980), Maciel (1991) e Costa Filho e deCampos (1991). Também foram considerados baixos quando comparados à uma compilação de dados a respeito de ângulos de atrito para solos residuais graníticos no estado de São Paulo (FUTAI; CECÍLIO JR.; ABRAMENTO, 2012). Supunha-se que poderia haver uma relativa concordância entre o ângulo de atrito interno dos solos com o ângulo de inclinação das encostas, o que não se verificou. A grande maioria dos dados concentra-se na faixa entre 7 e 25°, pequena demais para ser explicada pelas propriedades geomecânicas dos solos em questão.

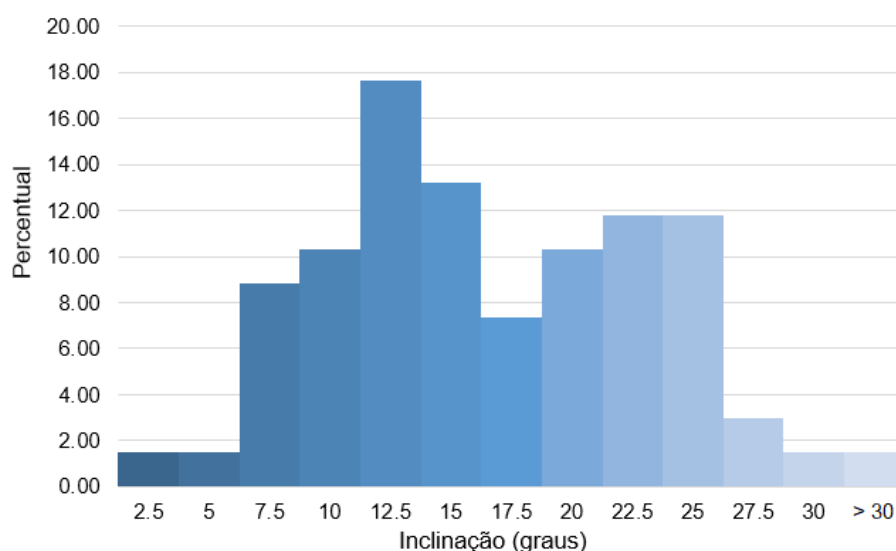


Figura 18 – Histograma de Inclinação

A respeito a distribuição de dados observada foram levantadas algumas hipóteses que pudessem explicar sua causa. Sabe-se que na área de estudo grande parte dos escorregamentos tem origem antrópica, em grande parte associados a cortes de talude e a estruturas de contenção precárias. Tais intervenções antrópicas são em geral pequenas demais para a resolução do mapa de inclinações, cuja base é um arquivo *SRTM* 30x30m. Acabam passando despercebidas e não sendo contempladas no modelo utilizado. Outra questão é a localização exata das ocorrências. Os laudos produzidos pela fundação GEO-Rio marcam a localização das ocorrências de forma aproximada, no sentido de que os pontos de tomada de medidas são aqueles lugares onde houve algum dano ao patrimônio, isto é, o local em que o escorregamento interceptou alguma estrutura ou edificação, e não onde o movimento em si teve início. Além disso, a queda de blocos, comum na área de estudo, é uma tipologia que tem pouco ou nada a ver com a inclinação da encosta. Desta forma, a variável inclinação foi considerada de pouca confiabilidade para o presente estudo.

5.4 Ocorrências x Atributos Litológico-Estruturais

5.4.1 Densidade de Lineamentos

A distribuição das ocorrências segundo a densidade de lineamentos (figura 19), feita a partir do mapa homônimo (seção 4.4.5), apresenta assimetria positiva (cauda do lado esquerdo maior que a do lado direito), indicando a concentração de ocorrências em torno de valores relativamente baixos de densidade. Em uma primeira análise a variável em questão parece ser proporcionalmente inversa ao percentual de ocorrências, um comportamento contra-intuitivo. Observando-se mais atentamente, no entanto, pode-se sugerir a existência de duas populações de eventos, aqueles de baixa densidade (até 3.5Km^{-1}), que seriam pouco afetados por esta variável, e aqueles de alta densidade (a partir de 4.25Km^{-1}), para os quais esta pode desempenhar um papel significativo na deflagração de movimentos. Em outras palavras, pode-se inferir que a influência da densidade seja desprezível para pequenos valores, tornando-se significativa acima de certo limiar.

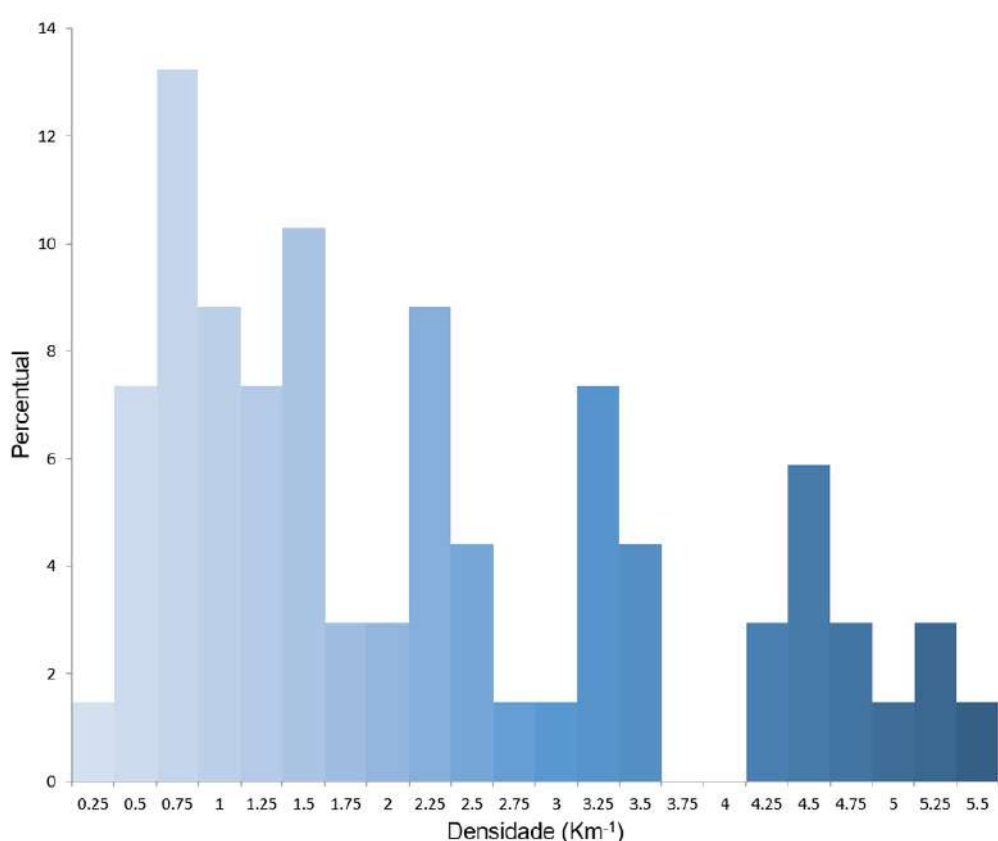


Figura 19 – Histograma de Densidade de Lineamentos

5.4.2 Distância de Lineamentos

A figura 20 mostra o histograma de frequências relativas das distâncias entre as ocorrências e o lineamento mais próximo, em que se pode ver uma forte correlação

inversa entre a distância e a frequência. Existe um grande pico de ocorrências dentro de um raio de até 100 metros do lineamento mais próximo, perfazendo quase 50% do total das ocorrências.

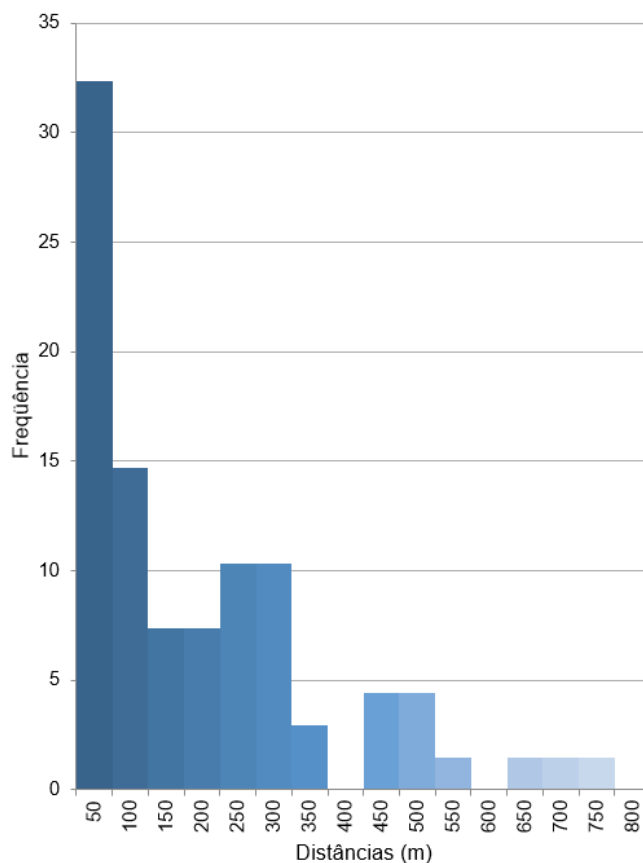


Figura 20 – Histograma das distâncias das ocorrências ao lineamento mais próximo

Acredita-se que a relação indicada pelo gráfico tenha causas tanto naturais (de natureza estrutural) quanto antrópicas (ocupação preferencial de vales). O peso dessa variável no todo deve ser avaliado na análise conjunta dos atributos deste trabalho, o que será mostrado na seção 5.7 (PCA).

5.4.3 Geotecnia

A caracterização geológica- geotécnica se baseou no mapa geológico-geotécnico do município (Fundação Geo-Rio, 2014), sendo os dados apresentados no gráfico a seguir (figura 21) resultado do cruzamento espacial do mapa com as ocorrências.

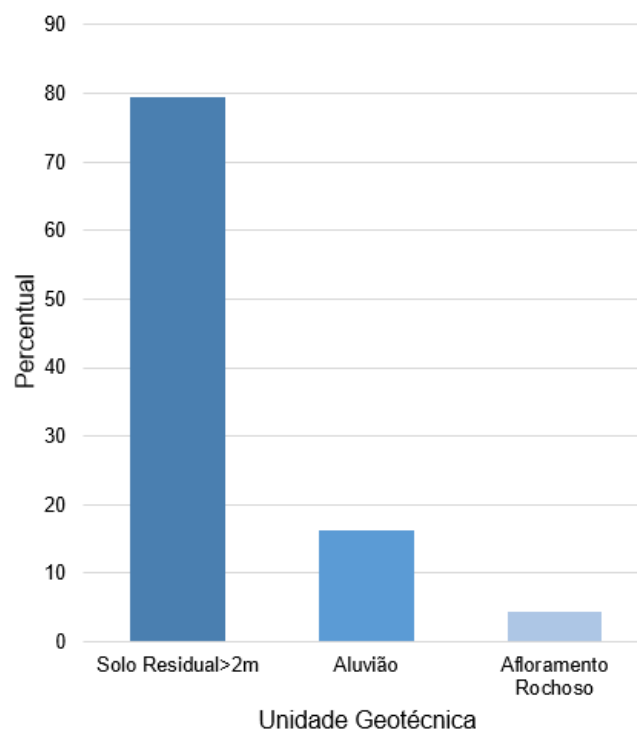


Figura 21 – Frequência relativa de ocorrências por unidade geotécnica

Foram identificadas apenas três unidades geotécnicas com ocorrências para a área de estudo segundo o mapa disponível. É necessário destacar que, após verificação cuidadosa, a unidade geotécnica identificada no mapa como “aluvião” na verdade constitui-se de depósitos quaternários, entre eles depósitos de tálus, colúvio e aluviões. Especificamente para a área de estudo é provável que as ocorrências identificadas como “aluvião” sejam na verdade coluvionares. Assim sendo, o gráfico mostra que a grande maioria dos eventos se desenvolve em perfis de solo espessos, que é seguido de solos transportados e por fim de rocha nua. Este resultado aponta para a importância das propriedades geomecânicas de solos residuais como fatores determinantes na deflagração de movimentos de massa na área de estudo.

5.4.4 Litologia

A caracterização geológica se baseou no mapa geológico do município (Fundação Geo-Rio, 2014), sendo os dados apresentados no gráfico a seguir (figura 22) resultado do cruzamento espacial do mapa com as ocorrências.

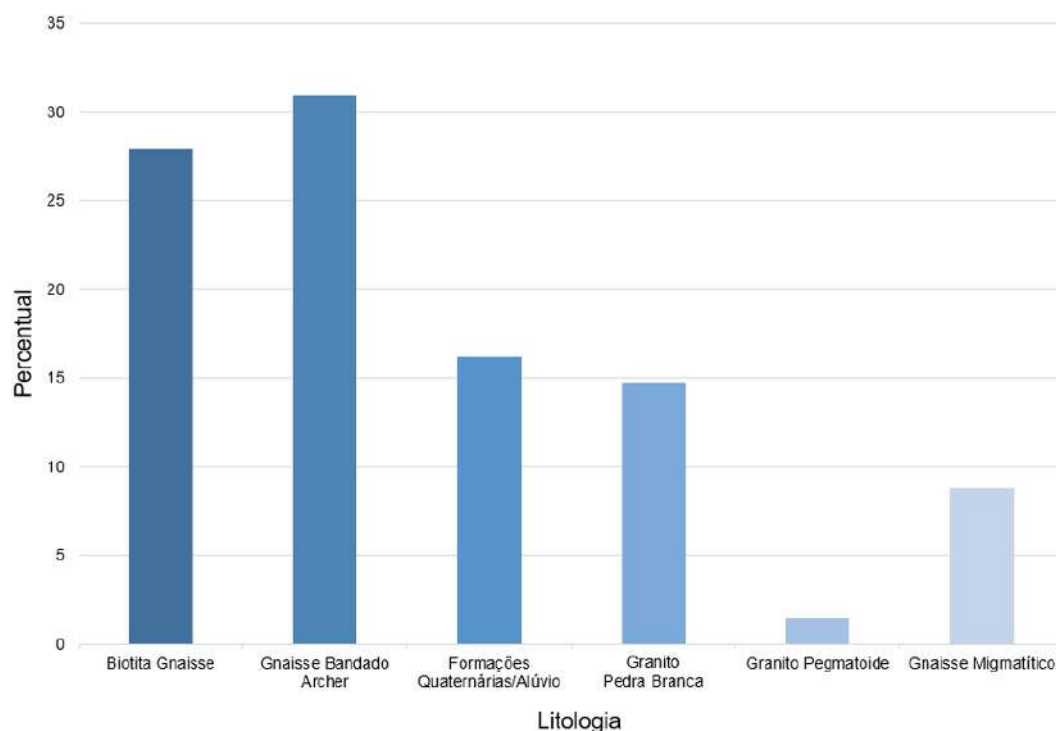


Figura 22 – Ocorrências por litologia

No gráfico vê-se claramente a predominância dos gnaisses sobre as demais litologias, que juntos somam quase 70% das ocorrências, muito embora estejam reduzidos a pouco mais de 20% da área total do maciço. Enquanto isso os granitos somam aproximadamente 16% das ocorrências, apesar de ocuparem quase 75% da área total. Eventos envolvendo formações quaternárias (tálus e colúvios) também são expressivos.

A relação quase inversa dos percentuais de área e a contribuição no total de eventos entre os granitos e os gnaisses tanto pode ser explicada pelas diferenças entre as propriedades geotécnicas dos solos residuais das duas litologias quanto pela ocupação humana na região, que se dá majoritariamente nas áreas de ocorrência de gnaisses. Qual das duas hipóteses é a que melhor explica as observações, ou em que medida os atributos litologia e uso do solo determinaram estes resultados é objeto de pesquisas futuras.

5.5 Ocorrências x Atributos do Espaço Geográfico

5.5.1 Uso do Solo

Na figura 23 está o resultado do cruzamento de dados com o mapa de uso de solo do município cedido pela Geo-Rio. Nele pode-se ver que aproximadamente 70% das ocorrências aconteceu em áreas com sob influência antrópica, com destaque para áreas de ocupação informal (“favelas”) e formal (“residenciais”).

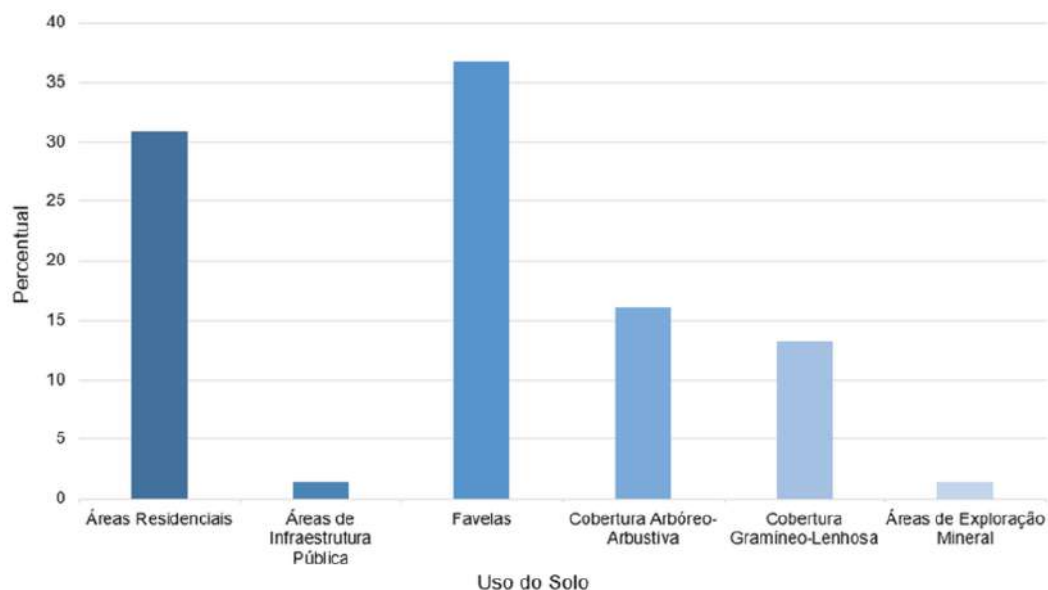


Figura 23 – Ocorrências segundo uso e ocupação do solo

Observando-se essa distribuição percentual e havendo analisado os laudos é possível afirmar que a influência antrópica é um dos principais fatores na deflagração de escorregamentos na área do maciço da Pedra Branca. Diversas ocorrências se localizam em áreas pouco ou nada modificadas pela ocupação humana, mas guardam uma relação de proximidade que justifica a ocorrência. Isto pode ser também verificado pela porcentagem expressiva (30%) de ocorrências fora de áreas diretamente afetadas pela presença do homem.

5.6 Ocorrências e Combinações de Atributos

Nesta seção são apresentadas algumas relações entre atributos que foram julgadas úteis na compreensão da questão em análise e que de alguma forma contribuíram com novas informações para a continuidade da pesquisa. Os resultados das combinações serão apresentados por atributo e estão listadas na tabela de combinações (figura 7).

5.6.1 Volume Mobilizado

Os gráficos a seguir mostram o cruzamento do atributo volume mobilizado nos eventos com a tipologia do movimento de massa, distância ao lineamento mais próximo, uso do solo e litologia.

Os eventos de maiores volumes (mais de 1000m³ - figura 24), pertencem às tipologias “queda” e “escorregamento rotacional”. Além disso foi verificado que estes eventos se deram sobre uma mesma litologia, dados que serão apresentados mais adiante.

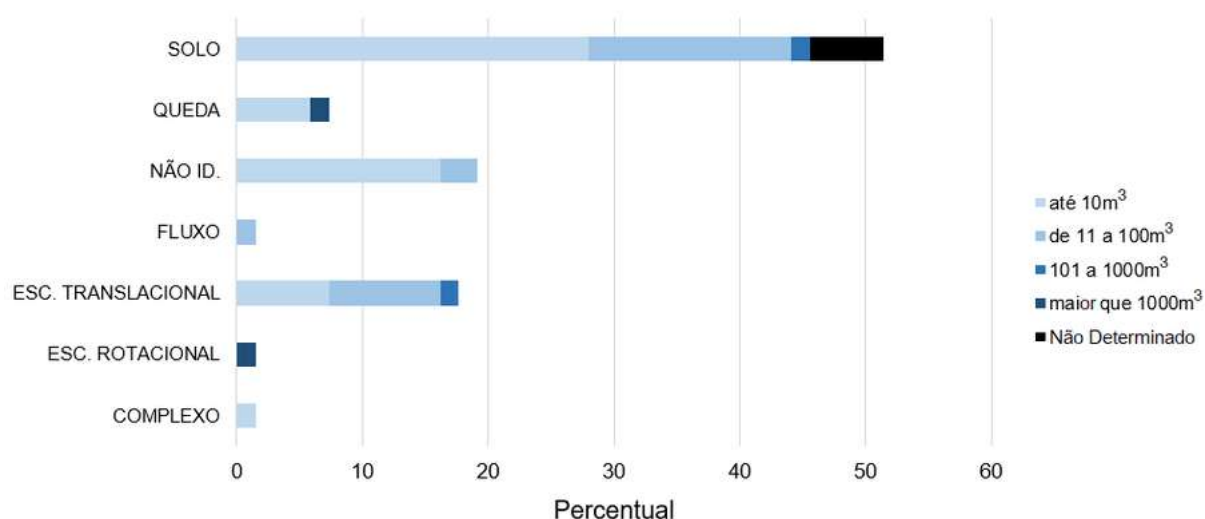


Figura 24 – Tipologia de Movimento x Volume Mobilizado

A figura 25 indica uma provável dependência dos volumes mobilizados dos lineamentos. Na tabela apresentada (quadro 26) ressalta-se, além das médias de distâncias para cada categoria de volume, a diminuição do desvio padrão (DP) desde a categoria de menor volume até as de maior volume. Supõe-se que a diminuição da dispersão nesta série de conjuntos amostrais possa indicar que eventos de grande volume ocorram com mais frequência mais próximos a lineamentos, que são elementos indicativos de feições estruturais.

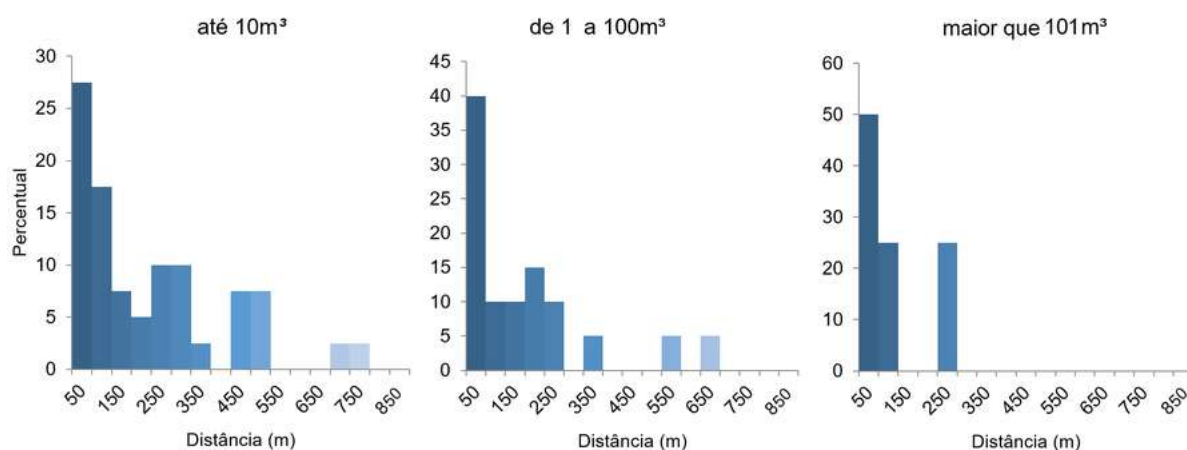


Figura 25 – Histograma de Distâncias aos lineamentos x Volume Mobilizado

	Distância Média (m)	DP
até 10m³	194.494	191.4
11 a 100m³	149.214	173.3
maior que 101m³	92.927	106.943

Figura 26 – Valores associados aos histogramas de distâncias aos lineamentos por categoria de volume mobilizado

O gráfico abaixo (figura 27) mostra basicamente que os maiores volumes são mais comuns em áreas ocupadas que em áreas naturais (coberturas gramíneo-lenhosas e arbóreo-arbustivas). Ocorrências de menor porte também são mais comuns em áreas com maior influência antrópica, no entanto possuem mais ou menos a mesma contribuição percentual para todas as categorias de uso do solo.

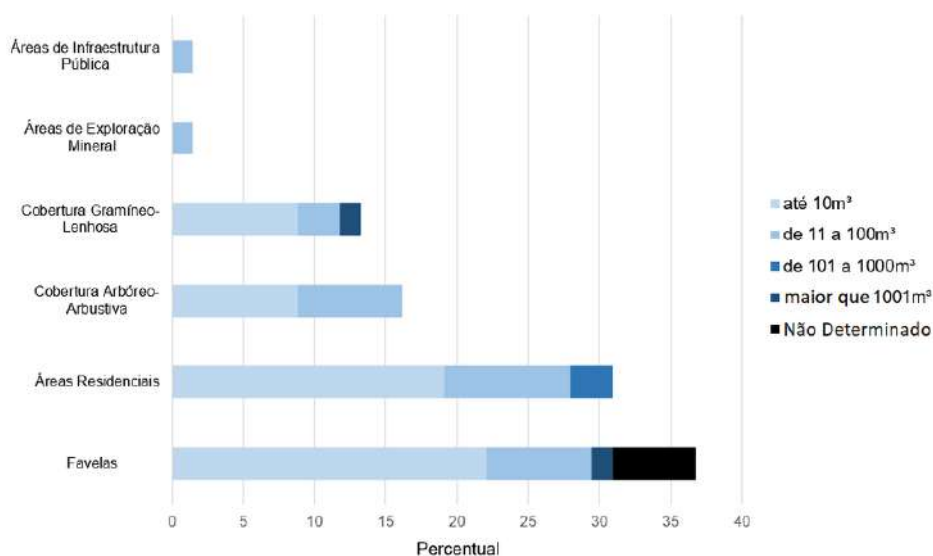


Figura 27 – Uso do Solo x Volume Mobilizado

Neste último gráfico de combinações envolvendo o volume (figura 28) mais uma vez a predominância dos gnaisses tanto na quantidade de eventos quanto no volume de cada evento. Embora o granito Favela possua eventos de categoria de 101 a 1000m³, a maioria dos eventos acima de 100m³ vem dos gnaisses, sendo que apenas o biotita gnaiss produziu eventos de mais que 1000m³.

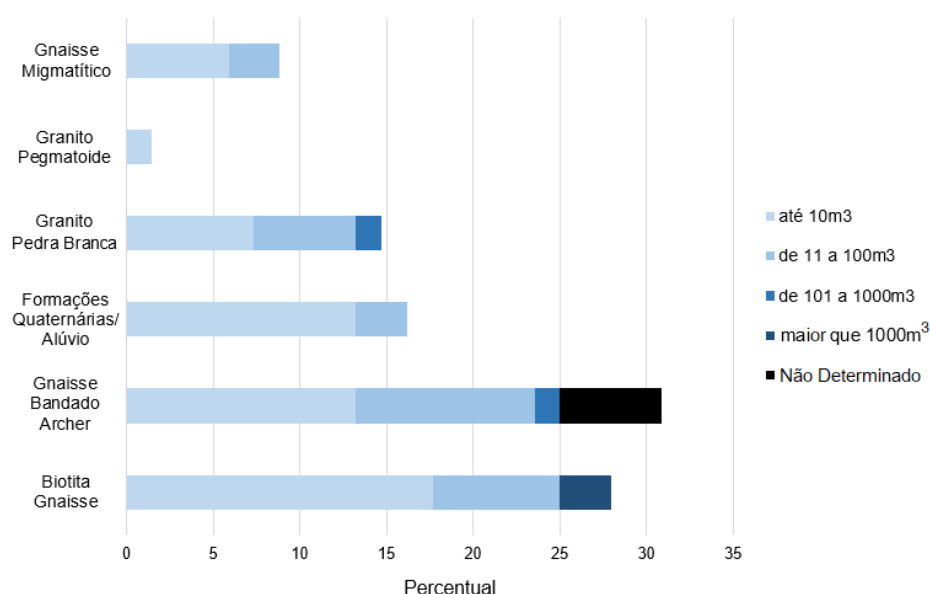


Figura 28 – Litologia x Volume Mobilizado

5.6.2 Litologia

Os gráficos a seguir mostram o cruzamento do atributo litologia com os atributos tipologia de movimento, densidade de lineamentos, distância ao lineamento mais próximo e uso do solo.

Quanto à relação entre tipologia e litologia (figura 29), todas as tipologias possuem uma composição similar, com os gnaisses predominantes e as demais litologias subordinadas (exceto aquelas tipologias que possuem somente uma ocorrência). Destaque para as quedas, em que os gnaisses têm a maior contribuição quando comparada às demais tipologias.

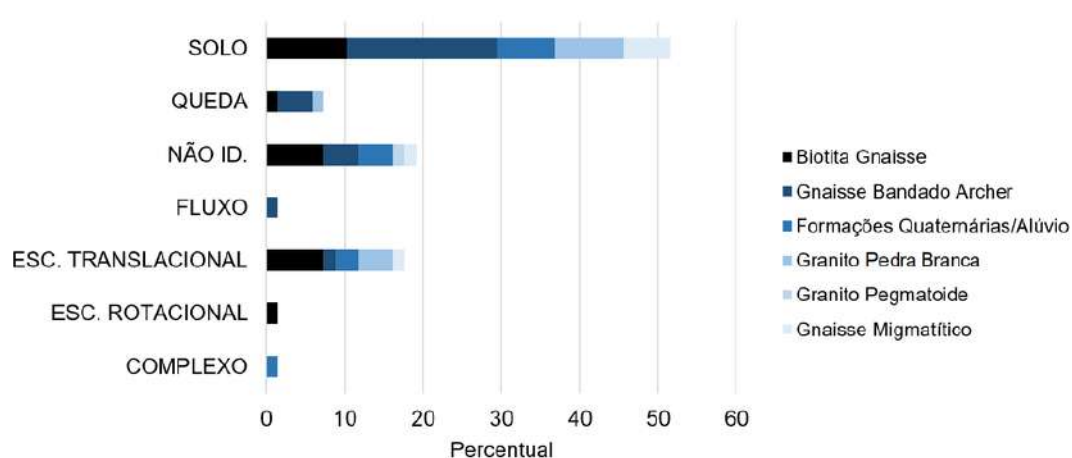


Figura 29 – Tipologia de Movimento x Litologia

Foram consideradas importantes as informações trazidas pela figura 30 e qua-

dro8, pois esclareceram o comportamento observado no histograma geral de densidade de lineamentos (seção 5.4.1, figura ??). Pode-se ver abaixo que as ocorrências com maior densidade de lineamentos (acima de 4,5), pertencem quase exclusivamente a duas litologias: em primeiro lugar o biotita gnaiss e secundariamente o gnaiss bandado (Archer). Estas duas também possuem as maiores médias de densidade. Estas observações se tornam ainda mais relevantes quando se relembra que as quedas são devidas basicamente a estas duas litologias.

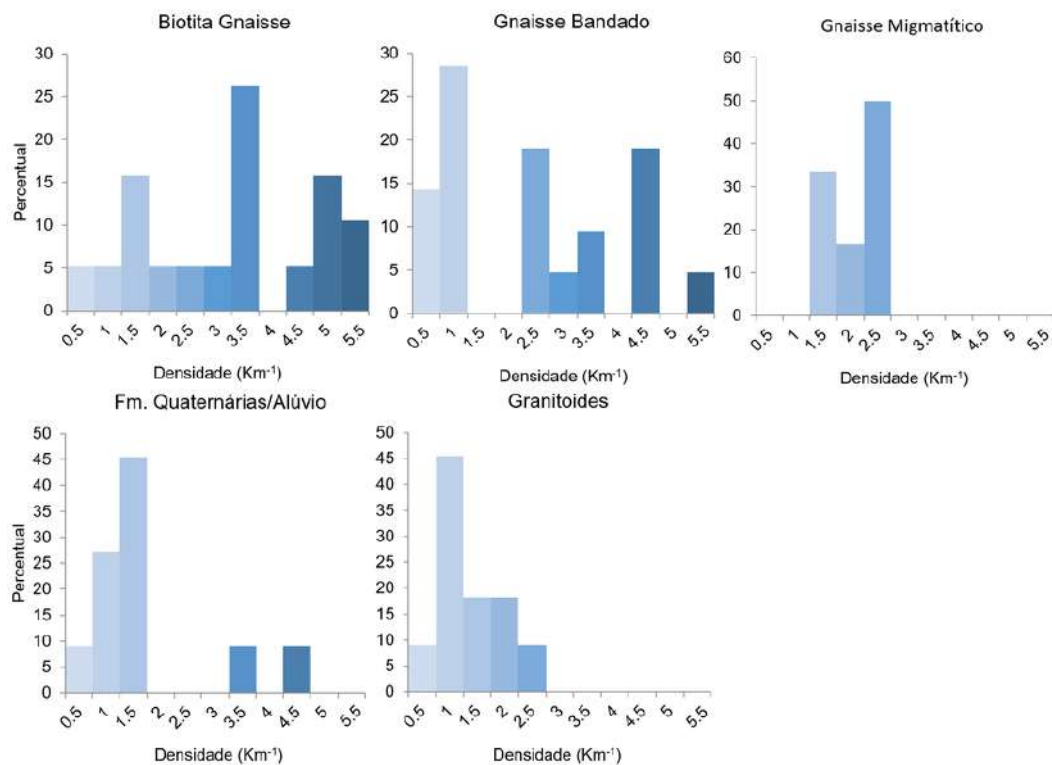


Figura 30 – Histogramas de Litologia x Densidade de Lineamentos

	Densidade Média (Km ⁻¹)
Biotita Gnaiss	2.961
Gnaiss Bandado Archer	2.172
Formações Quaternárias/Alúvio	1.519
Granito Pedra Branca	1.175
Granito Pegmatoide	0.762
Gnaiss Migmatítico	1.746

Quadro 8 – Valores associados aos histogramas de densidade de lineamentos por litologia

Os dados apresentados na figura 31 e no quadro 9 foram selecionados porque mostram os diferentes graus de dependência das litologias da variável distância ao

lineamento mais próximo, especialmente nos casos do gnaiss migmatítico e do biotita gnaiss, que se mostram altamente concentrados nas menores distâncias. Pode-se traçar comparativos com os gráficos de densidade de lineamentos por litologia (figura 30), uma vez que este comportamento seria esperado dos gnaisses pois possuem as maiores médias de densidade de lineamentos, e com os histogramas de distância por volume mobilizado (figura 28) onde a distribuição de ocorrências na classe de maior volume ($> 101\text{m}^3$) é muito semelhante àquela do biotita gnaiss e do gnaiss migmatítico nos histogramas abaixo. Além disso percebe-se a alta concentração também dos granitoides próxima à origem, embora comparativamente aos gnaisses possuam baixa densidade de lineamentos. Esta observação pode indicar que as ocorrências sobre substrato granítico estejam associadas a lineamentos específicos, enquanto que aquelas sobre gnaisses estejam associadas a muitos deles, em regiões com maior grau de fraturamento e portanto com uma maior densidade de lineamentos.

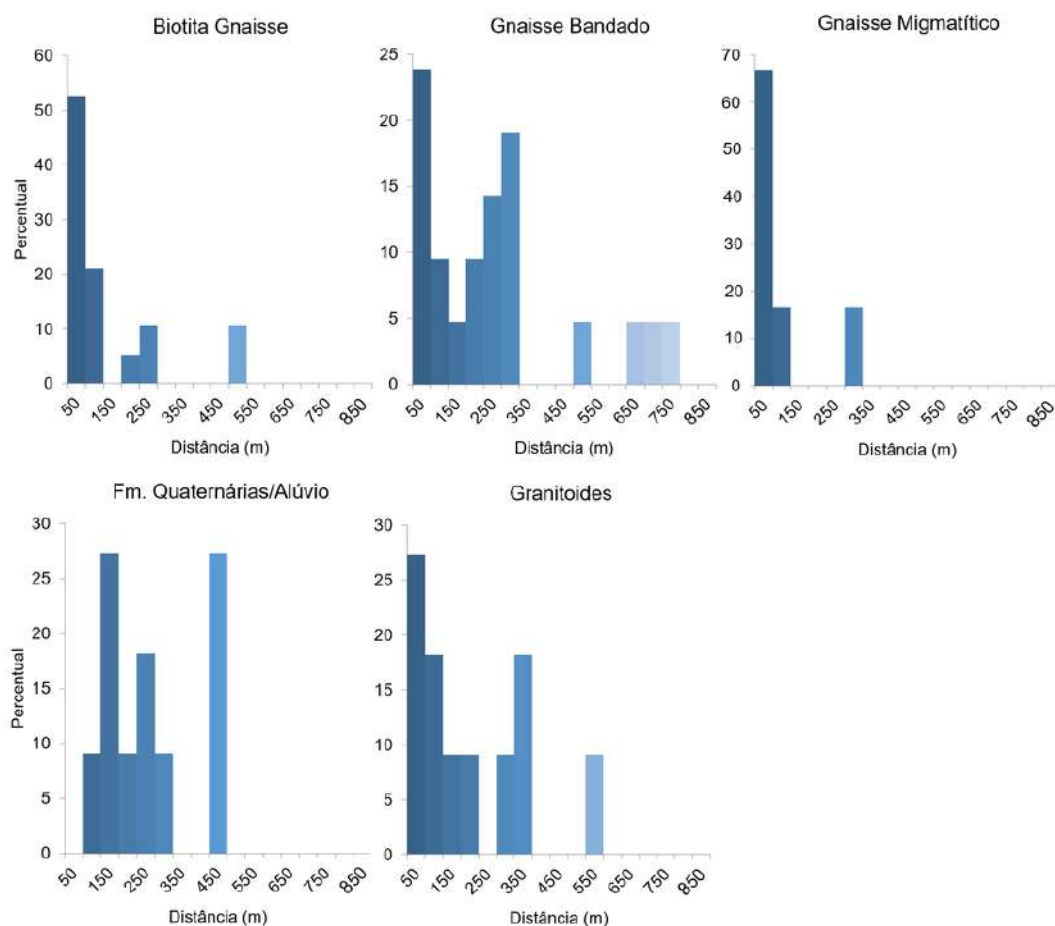


Figura 31 – Histogramas de distribuição de distâncias por litologia

	Distância Média (m)
Biotita Gnaiss	108.7
Gnaiss Bandado Archer	236.7
Formações Quaternárias/Alúvio	233.4
Granitoides	121.8
Gnaiss Migmatítico	65.2

Quadro 9 – Valores associados aos histogramas de distâncias ao lineamento mais próximo por litologia

Já quanto às litologias associadas a cada uso do solo é interessante notar que há um claro predomínio dos gnaisses em todas as categorias, muito embora os granitoides ocupem aproximadamente 75% da área de estudo. Ou isto é o resultado de uma maior fragilidade dos solos residuais gnáissicos ou as áreas ocupadas preferencialmente na região foram justamente aquelas de gnaiss, ou ainda uma combinação dos dois.

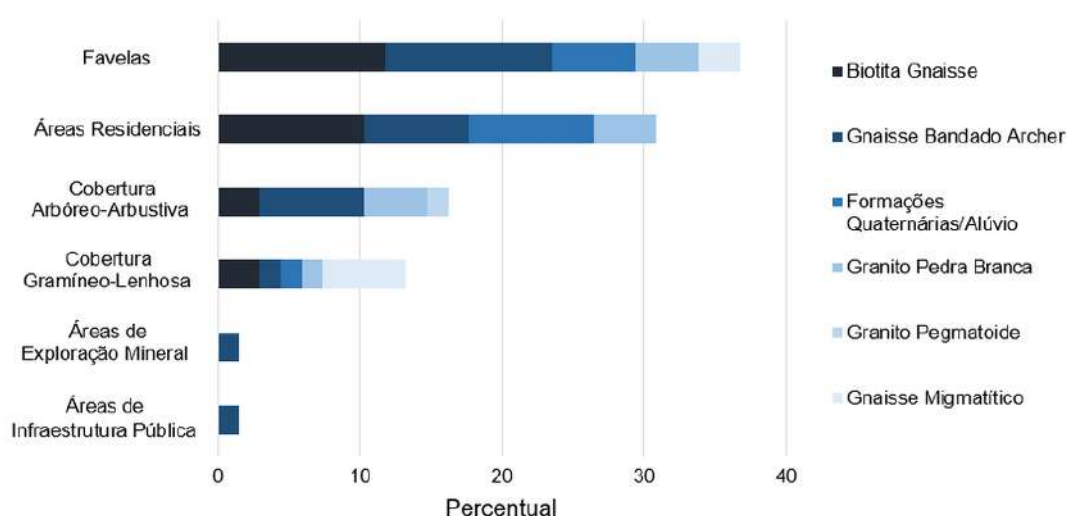


Figura 32 – Uso do Solo x Litologia

5.6.3 Distância ao Lineamento mais Próximo

Os gráficos a seguir mostram o cruzamento do atributo distância ao lineamento mais próximo com os atributos tipologia de movimento, densidade de lineamentos, geometria de encosta e uso do solo.

Um aspecto a ser ressaltado quanto à distância ao lineamento mais próximo (figurav33) está relacionado às quedas. A distribuição uniforme de ocorrências da desta tipologia mostra sua independência da distância ao lineamento mais próximo, ao

passo que as outras tipologias e o comportamento geral das ocorrências segue uma distribuição mais próxima da exponencial segundo a distância. Supôs-se primeiramente que a distância entre a tomada de dados (local da ocorrência) e o local exato do desprendimento que gerou a queda pudesse explicar esse comportamento, o que no entanto não explica satisfatoriamente a distribuição uniforme. A região é rica em bôulderes, que ocorrem tanto isolados como empilhados. O que se imaginou então é que os bôulderes que geraram as ocorrências estivessem distribuídos uniformemente sobre a superfície do terreno, o que poderia ser explicado por eventos anteriores que os espalharam pelas encostas ou por um grau de fraturamento e intemperismo tais que produzissem este mesmo efeito sobre uma certa área ou litologia. Verificou-se posteriormente que as litologias que produziram as quedas possuem as maiores médias de densidade de lineamentos (seção 5.4.1), o que pode ser indício de um maior grau de fraturamento, justificando a uniformidade observada no histograma central da figura 33.

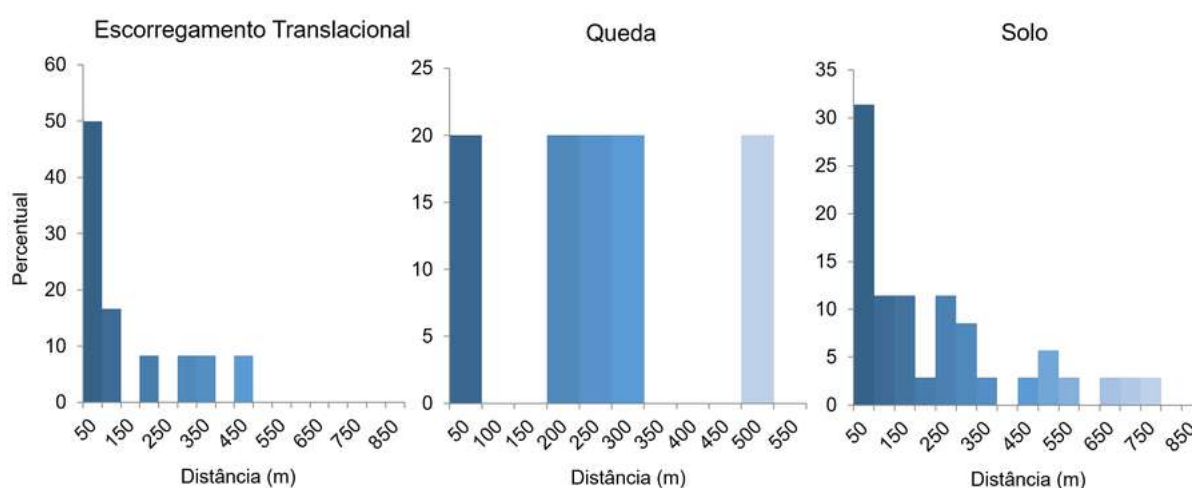


Figura 33 – Tipologia de Movimento x Distância ao lineamento mais próximo

O gráfico de dispersão distância ao lineamento mais próximo x densidade de lineamentos (figura 34) foi importante como definição das duas como variáveis distintas, ou seja, não reduntantes. Vê-se no gráfico que, embora mantenham certa relação entre si, não são dependentes uma da outra, ao menos linearmente. A relação entre elas é melhor descrita como uma área triangular que engloba a maioria dos pontos. O que ele mostra é que eventos que ocorreram em regiões onde a densidade de lineamentos é maior também têm maior possibilidade de estarem mais próximos de algum desses lineamentos. Nota-se que, com isso, é possível ter densidades altas e baixas muito próximas de lineamentos, mas no entanto é difícil encontrar densidades altas muito longe de lineamentos, sugerindo uma proporção de grandeza inversa (ver seção 5.7.2).

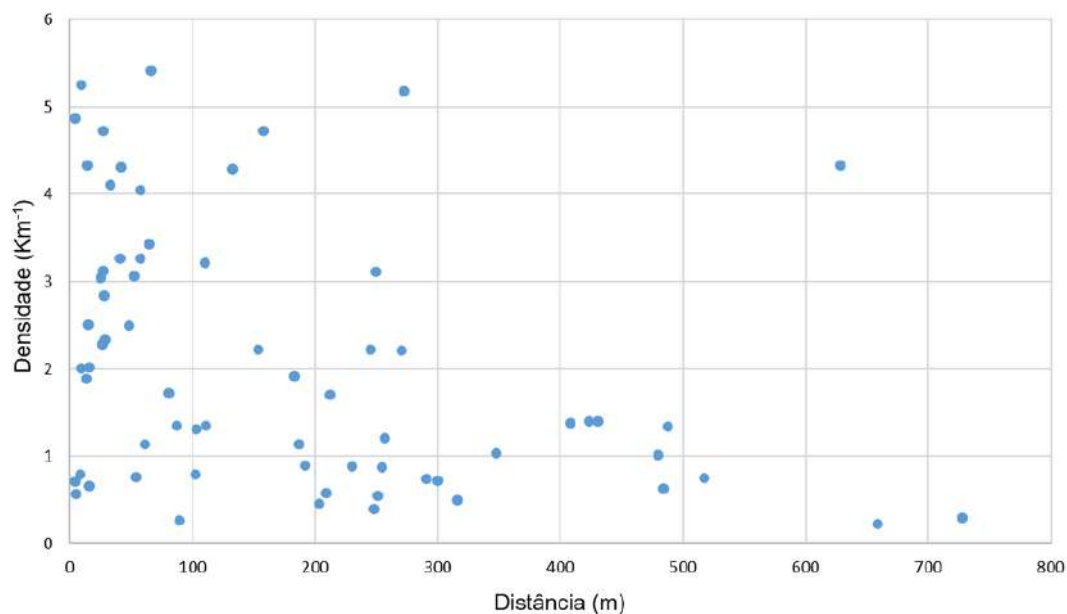


Figura 34 – Gráfico de dispersão de distância ao lineamento mais próximo x densidade de lineamentos

O diagrama da figura 35 é o mesmo apresentado na seção 5.3.1, acrescido de círculos cujo diâmetro é proporcional à distância do ponto em questão (localização geográfica do evento de movimento de massa) ao lineamento mais próximo. Observa-se que as ocorrências localizadas no terceiro quadrante (vertentes convexas-divergentes, geometria de encosta amplamente desfavorável ao acúmulo de fluxo superficial e portanto, menos propensa a experimentar escorregamentos de terra) possuem todos pequenos raios (ocorreram em média até 100m de um lineamento), o que pode indicar influência da geologia estrutural na deflagração destes eventos.

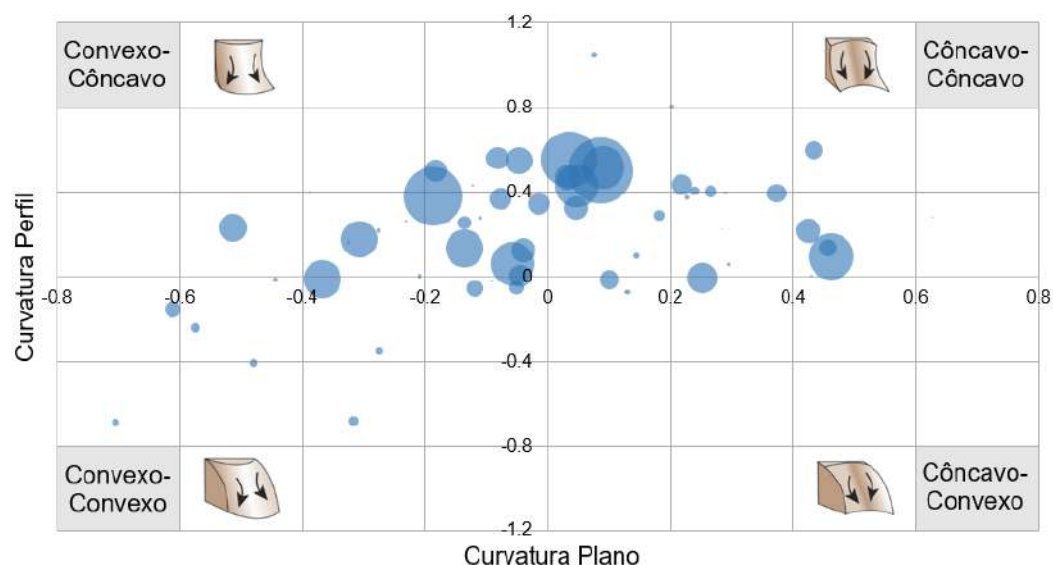


Figura 35 – Diagrama Curvatura em Plano x Curvatura em Perfil x Distância ao Lineamento mais Próximo

Os histogramas de uso do solo x distância ao lineamento mais próximo (figura 36) foram destacados porque podem sugerir a extensão do fator antrópico sobre a variável da distância. O quadro 10 mostra os desvios-padrão para coberturas antrópicas e naturais (gramíneo-lenhosas e arbóreo-arbustivas), cujo espalhamento de dados é bem menor que nas primeiras. Isto vem apoiar a hipótese de que a intervenção humana diminui a previsibilidade dos fenômenos naturais ao aumentar a caoticidade do sistema.

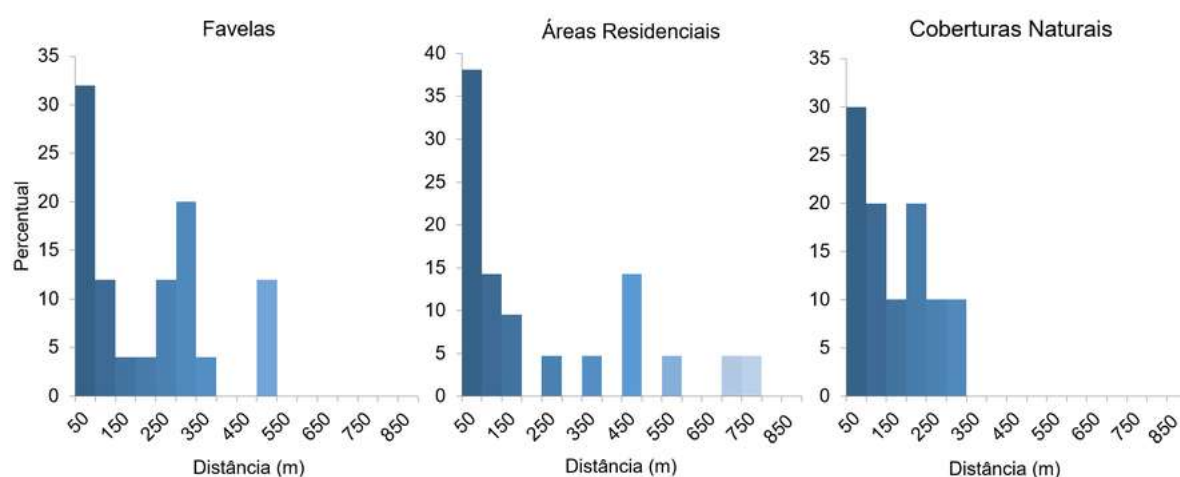


Figura 36 – Histogramas de Uso do Solo x Distância

	Distância Média	DP
Favelas	174.5	157.8
Áreas Residenciais	205.9	232.3
Cobertura Arbóreo-Arbustiva	126.6	97.1
Cobertura Gramíneo-Lenhosa	115.3	

Quadro 10 – Valores associados aos histogramas de Uso do Solo x Distância

5.7 Análise de Componentes Principais (PCA)

5.7.1 Diagrama Quantitativo Geral

A partir das seis variáveis iniciais quantitativas (concavidades em plano e em perfil, orientação de vertente, inclinação das encostas, densidade de lineamentos e distância de lineamentos), quatro foram escolhidas para o cálculo do diagrama geral. A variável “inclinação” foi retirada (pelos motivos levantados na seção 5.3.3). As variáveis foram ordenadas em ordem decrescente e a menor delas, no caso a variável “azimute”, foi retirada na primeira iteração do método (seção 5 e quadro 9 a seguir),

restando para a segunda iteração (quadro 12) a distância ao lineamento mais próximo, a densidade de lineamentos e as curvaturas em plano e em perfil (figura 37).

	C1	C2	SOMA (módulo)	ORDEM
AZIM	-0.185	0.459	0.644	5
DIST	-0.420	0.535	0.955	2
Cpla	-0.527	-0.401	0.928	3
Cper	0.455	0.518	0.973	1
DENS	0.552	-0.257	0.809	4

Quadro 11 – Resultado da primeira iteração do método, em que se retirou a variável de menor peso (em vermelho). AZIM = Azimute; DIST = Distância ao Lineamento mais Próximo; Cpla = Curvatura em plano; Cper = Curvatura em perfil e DENS = Densidade de Lineamentos.

	C1	C2	SOMA (módulo)	ORDEM
DIST	0.223	0.696	0.919	3
Cpla	0.630	-0.278	0.908	4
Cper	-0.599	0.371	0.970	2
DENS	-0.441	-0.548	0.989	1

Quadro 12 – Resultado da segunda iteração, com quatro variáveis de peso semelhante.

O método aplicado desta forma resultou numa variância acumulada de 70,5% nas duas primeiras componentes, valor considerado razoável. Isto significa que 70,5% da variação observada nos dados pode ser explicada por duas componentes, a primeira representando o eixo de maior variância dos dados e a segunda o eixo de segunda maior variância, ortogonal ao primeiro. As componentes são uma combinação das quatro variáveis analisadas (ilustrado no diagrama abaixo - figura 37 e discriminado no quadro 13) segundo a proporção das suas projeções sobre os eixos. No quadro, além das duas componentes mostradas na figura estão também as componentes nos espaços de 3 e 4 dimensões, que possuem importância secundária na análise.

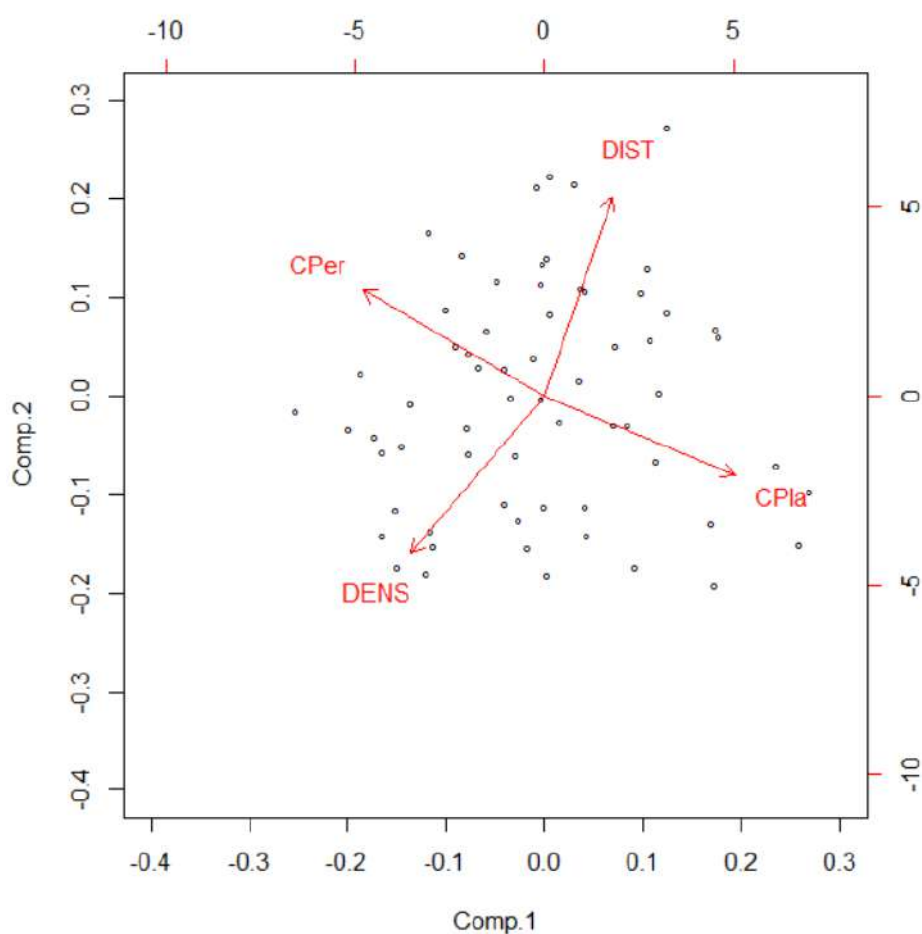


Figura 37 – Resultado do PCA para as quatro variáveis analisadas

Variância	C1	C2	C3	C4
Individual (%)	37,4	33,2	15,6	13,9
Cumulativa (%)	37,4	70,5	86,1	100
Variáveis	Peso das Variáveis			
Distância	0,223	0,696	0,597	-0,331
Curvatura Plano	0,630	-0,278	0,418	0,593
Curvatura Perfil	-0,599	0,371	0,172	0,689
Densidade	-0,441	-0,598	0,663	-0,255

Quadro 13 – Quadro do Diagrama Quantitativo Geral

Do diagrama e do quadro percebe-se que as curvaturas em plano e em perfil (atributos relativos à geomorfologia) possuem a maior influência na componente 1, a componente de maior importância, mostrando assim a primazia dos atributos geomor-

fológicos. Já os atributos estruturais (distância e densidade) compõe a maior parte da componente 2, vindo logo depois em ordem de importância.

No diagrama, o tamanho e a direção dos vetores também possui significado. Quanto maior o tamanho, maior a importância da variável e vice versa. Quanto menor o ângulo entre dois vetores (aproximado-se de 0°), mais diretamente correlacionáveis eles são (maior a influência mútua entre as variáveis em questão, sendo diretamente proporcionais). Já se o ângulo se aproxima de 180° , as variáveis são inversamente correlacionáveis (grande influência mútua, inversamente proporcionais) e se o ângulo é próximo de 90° , as variáveis são independentes e não-correlacionáveis.

Do exposto pode-se definir duas famílias de variáveis inversamente correlacionáveis e que não são correlacionáveis (ou muito pouco) entre si: o par curvatura plano/perfil e o par distância/densidade. Dizer que estes pares têm uma relação inversa significa que as variáveis que compõe cada par apresentam uma *tendência* de proporcionalidade inversa, mais do que dizer que são, realmente, inversas, como explicado na seção 5.6.3, no gráfico de distância x densidade.

Os pontos indicados no diagrama representam as ocorrências, e a sua localização é também significativa. Dividindo o diagrama em quadrantes aproximados, em que os vetores formam seus limites, o método mostra que fatores influenciaram mais cada ponto segundo sua localização relativa. Quanto mais afastados da origem e mais próximos de um vetor, mais clara é a relação com uma das duas famílias apontadas. Se por outro lado o ponto está no interior de um quadrante, é mais provável que tenha sido influenciado de modo aproximadamente igual pelas duas famílias. Se se localiza no lado das curvaturas em plano, esta é uma indicação de que esta variável foi preponderante em relação à curvatura em perfil neste caso e vice-versa. Se se encontra na metade em que está o vetor das distâncias, é uma indicação do método de que este ponto foi mais influenciado pela distância a um lineamento específico que pelo efeito somado de vários lineamentos (densidade).

Assim, vê-se que na área de estudo existem fatores independentes entre si que atuam conjuntamente na deflagração de escorregamentos e que as ocorrências estão distribuídas de maneira bastante uniforme nas áreas de influência de cada um.

5.7.2 Diagramas segundo Atributos Qualitativos

O método do PCA foi aplicado a subgrupos de ocorrências segundo atributos qualitativos (que não são contemplados diretamente pelo método) desde que os subgrupos alcançassem o mínimo de 20 observações. Os subgrupos que puderam ser formados estão no quadro 14.

Uso do Solo	Áreas Residenciais	Favelas	Coberturas Naturais
Volume	A	B	B + C + D
Geomorfologia	Côncavo-Côncavo	Côncavo-Côncavo + Convexo-Côncavo	Convexo-Côncavo + Convexo-Convexo
Litologia	Gnaisses		
Tipologia	Solo		

Quadro 14 – PCA's segundo atributos qualitativos

Os diagramas resultantes foram agrupados em duas grandes divisões: a primeira, em que todos possuem os vetores curvatura plano/perfil e distância/densidade formam um “X” (vetores de cada família em lados opostos - figura 39) e a segunda, em que os vetores formam um “T” (vetores de mesma família apontando para o mesmo lado - figura 39). Quais variáveis têm predominância na componente 1 e os valores de variância acumulada das componentes 1 e 2 são mostrados nos quadros 15 e 16. Para os PCA's dos subgrupos esperava-se uma resolução maior do método, isto é, uma variância acumulada superior àquela do PCA geral, o que nem sempre se verificou. Lembrando que quanto maior o valor de variância acumulada, melhor a resolução do método.

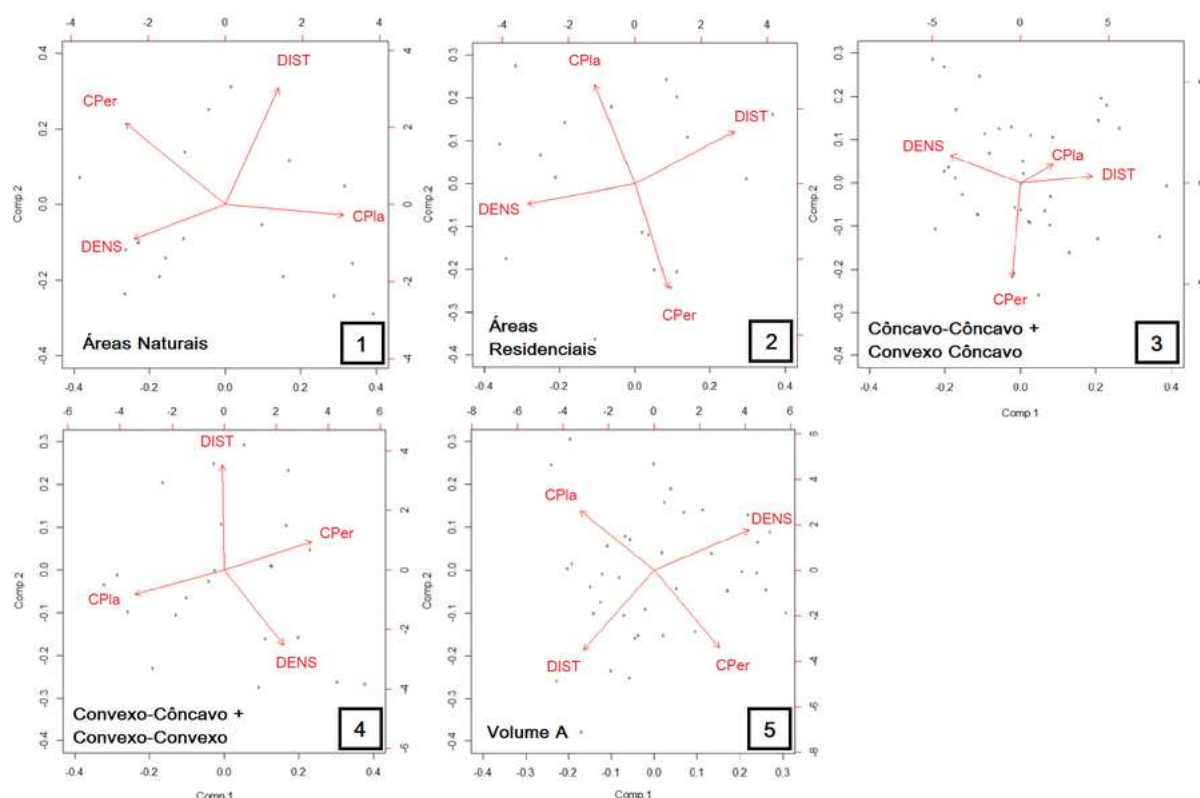


Figura 38 – Diagramas em forma de “X”

Os diagramas acima possuem o mesmo comportamento observado no diagrama

geral (figura 37), com pares aproximadamente ortogonais de vetores com sentidos opostos. Todos são bem parecidos e com distribuição similar de ocorrências, à exceção do diagrama 3 (perfis côncavos ou côncavo-côncavo + convexo-côncavo), em que a curvatura em plano tem papel subordinado (menor módulo).

Diagrama	Predominante na Componente 1	Variância Acumulada nas Componentes 1 e 2 (%)
1	Curvaturas	74,4
2	Distância/Densidade	72,2
3	Distância/Densidade	62,8
4	Curvaturas	79,2
5	Densidade	78,1

Quadro 15 – Resumo dos diagramas 1 a 5

A partir dos dados do quadro 15 é interessante notar que há predominância da família de atributos geomorfológicos no diagrama 4 (superfícies divergentes ou convexo-côncavo + convexo-convexo), uma vez que supunha-se que em superfícies divergentes (desfavoráveis geomorfológicamente à deflagração de movimentos de massa) os atributos estruturais deveriam ter papel predominante. Semelhantemente, esperava-se que os atributos geomorfológicos fossem predominantes no diagrama 3 (perfis côncavos), o que não se verificou. Desta forma reitera-se a afirmação de que métodos estatísticos são indicadores de tendências e não-prescritivos quanto à natureza da realidade. Modelos matemáticos devem se moldar à realidade, e não o contrário. Os resultados aqui expostos devem ser avaliados com uma cautela científica, vindo a ser validados ou descartados com a continuidade da pesquisa e obtenção de mais dados. A relativa escassez de dados e o tamanho reduzido dos subgrupos também pode ser um fator de geração de incertezas e diminuição da acurácia do método (notar a baixa variância acumulada do diagrama 3, menor que a variância do conjunto total de dados - figura 37). Outro destaque é o diagrama 5, em que a densidade sobressaiu sobre as outras variáveis, levantando a hipótese de que eventos de pequeno porte (até 10m³) ocorrem principalmente em áreas bastante fraturadas (alta densidade de lineamentos).

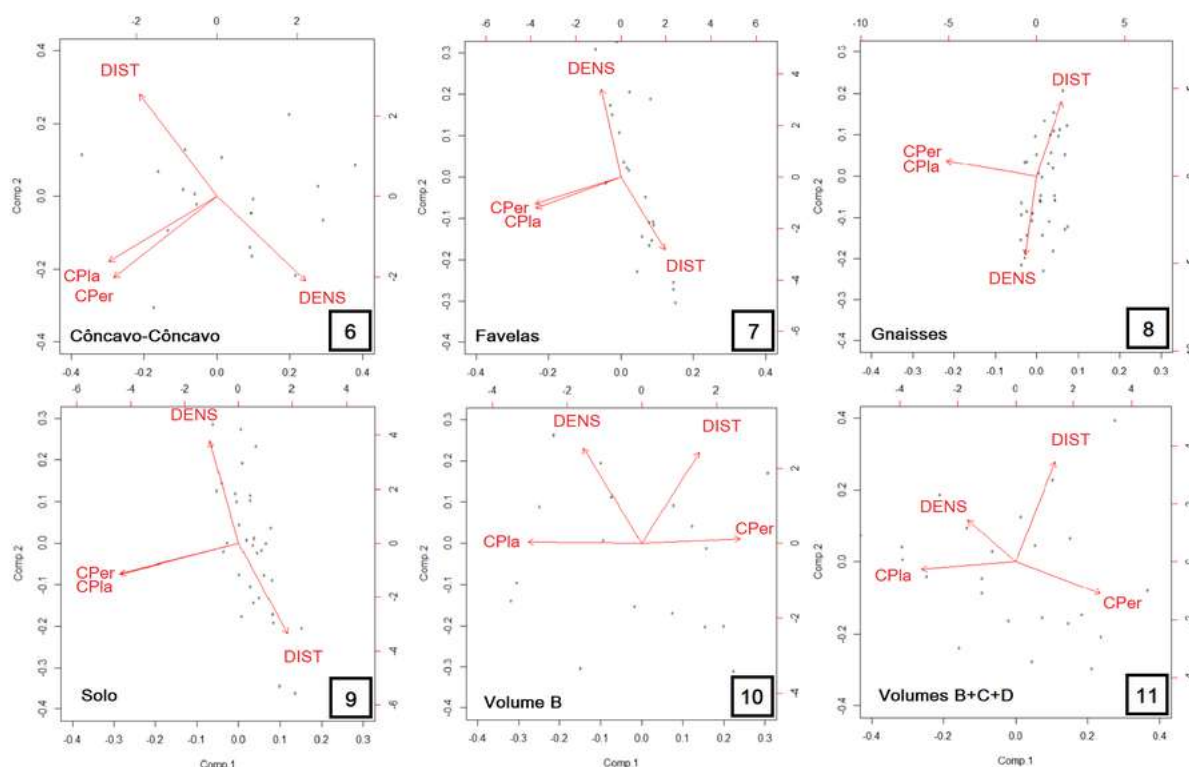


Figura 39 – Diagramas em forma de “T”

Já os diagramas “em T” possuem algum vetor invertido em relação ao diagrama geral, indicando que nestes subgrupos as variáveis curvatura plano/perfil ou distância/densidade mantêm entre si uma tendência de correlação direta, sugerindo que estes são eventos promovidos quando ambas as variáveis de uma família possuem valores altos. Nos diagramas 6 a 9 as variáveis curvatura em perfil e curvatura em plano aparecem juntas e nos diagramas 10 e 11, as variáveis distância e densidade. Notar que há possivelmente grande sobreposição de pontos nos diagramas 7, 8 e 9, indicando uma possível correlação entre os atributos envolvidos. Outra observação interessante surge dos diagramas 10 e 11, que contemplam os subgrupos de eventos com as maiores categorias de volume (B, C e D). Diferentemente do que ocorre nos eventos de até 10m³ (categoria A), as variáveis densidade e distância parecem manter uma fraca relação direta ou independente entre si. A pequena correlação sobressai na resolução baixa do método (diagrama 11). Ainda assim os resultados sugerem que nestes casos a densidade e a distância sejam independentes, com a distância sobressaindo sobre a densidade, o que concorda com os histogramas de volume x distância (figura ??).

Diagrama	Predominante na Componente 1	Variância Acumulada nas Componentes 1 e 2 (%)
6	Curvaturas	70,6
7	Curvaturas	86,6
8	Curvaturas	80,7
9	Curvaturas	80,0
10	Curvaturas	65,1
11	Curvaturas	63,5

Quadro 16 – Resumo dos diagramas 6 a 11

Nos diagramas 6 a 11 houve claro predomínio dos atributos geomorfológicos segundo o método utilizado. Esperava-se que para os gnaisses e categorias B, C e D de volumes a contribuição dos atributos estruturais predominasse. Notar a baixa resolução dos diagramas 10 e 11. É importante frisar novamente, diante destas observações, as limitações do método e a escassez de dados, questão já levantada anteriormente.

6 Conclusão

Das estatísticas preliminares alguns resultados foram compatíveis com o esperado: a predominância de eventos de pequeno porte, dos perfis côncavos, dos solos residuais, da litologia gnáissica e das favelas e áreas residenciais no uso do solo. Houve também resultados interessantes que não haviam sido imaginados, como por exemplo a forte correlação entre as ocorrências e a distância ao lineamento mais próximo, o comportamento da variável densidade (que se torna relevante apenas a partir de um determinado valor), a orientação de vertentes que reflete o *trend* estrutural da área e a não-representatividade dos dados de inclinação gerados a partir do SRTM de 30m.

A maioria dos resultados advindos da combinação de atributos foi inédita. Esperava-se, por exemplo, que a tipologia “queda” estivesse associada aos granitos, predominantes na região, devido ao intemperismo característico dessas rochas (fragmentação em bôulderes), mas 4/5 destas ocorrências está na realidade associada a gnaisses. Estes apresentaram valores mais altos de densidade de lineamentos, o que explica a baixa correlação da tipologia “queda” com a distância ao lineamento mais próximo. O biotita gnaisse, o gnaisse migmatítico e os granitoides apresentaram a melhor correlação com a distância, sendo que a distribuição dos gnaisses se assemelha aos deslizamentos de maior proporção registrados na região. Os granitoides possuem baixo valor de densidade de lineamentos e grande dependência da distância ao lineamento mais próximo, ao passo que os gnaisses em geral possuem as maiores densidades de lineamentos entre as litologias e grau variável de dependência da distância ao lineamento mais próximo. Isso sugere que ocorrências ligadas aos granitoides tenham em sua gênese a influência de zonas de fraqueza específicas, enquanto que aquelas ligadas a gnaisses estejam tanto sob a influência de zonas de fraqueza específicas quanto de zonas mais difusas, em que há influência de múltiplas zonas de fraqueza. O comportamento dos gnaisses pode explicar deste modo a distribuição bimodal do histograma de densidades. Vale notar que os deslizamentos de categoria D (os maiores) ocorreram todos sobre biotita gnaisse, e destes a maioria em áreas de ocupação humana, primeiro em favelas e depois em áreas residenciais. Alguns resultados mostraram a diferença entre ocorrências em meios naturais e modificados pelo homem. O espalhamento e aleatoriedade dos dados é maior em áreas modificadas que naturais, sugerindo que a intervenção humana aumenta a complexidade do problema e dificulta a previsibilidade dos fenômenos naturais. Outros mostraram que em compartimentos geomorfologicamente desfavoráveis (ex.: encostas convexas divergentes) têm componente estrutural (distância ao lineamento) preeminente na sua deflagração.

Já na análise de componentes principais (PCA), os resultados mostram que as

quatro variáveis envolvidas (densidade, distância, curvaturas em plano e em perfil) se agrupam em pares (distância/densidade e curvaturas) de grande correlacionabilidade, mas que possuem pouca correlação entre si. Isto é, os pares ou famílias formam dois conjuntos distintos de fatores que agem conjuntamente na deflagração de escorregamentos, mas de forma independente entre si. Eles podem manter tanto relações diretas (vetores apontando no mesmo sentido) quanto inversas entre si (vetores apontando em sentidos opostos), ou seja, podem se associar de formas diferentes de lugar para lugar.

Desta forma, cada ocorrência é influenciada de forma distinta segundo sua localização nos diagramas, em maior ou em menor grau por cada conjunto de fatores. Isto significa que a deflagração de escorregamentos é fruto de uma conjunção singular de fatores característica de cada localidade.

Quanto à componente principal propriamente dita, as ocorrências têm em geral os atributos geomorfológicos (curvaturas) preponderantes sobre os atributos estruturais (densidade/distância), tanto nos subgrupos quanto no diagrama geral, mostrando que para a maioria das ocorrências na área de estudo, as variáveis geomorfológicas predominaram sobre aquelas estruturais. No entanto, os pares/famílias que predominam na componente 1 podem mudar para cada subgrupo. Nem todos os PCA's rodados para cada subgrupo produziram os resultados esperados ou de boa resolução, o que foi atribuído ao tamanho reduzido dos subgrupos (escassez de dados), à qualidade dos dados originais e às limitações naturais do modelo estatístico.

A partir das conclusões acima listadas fica clara a diversidade e a complexidade associativa dos fatores pré-existentes dentro da área de estudo, que condicionam a resposta dos materiais (solo e rochas) a EPS's. Apesar da complexidade do problema, ao final da análise alguns fatores potencializadores de risco foram identificados e são destacados a seguir, em ordem de importância:

- 1) Encostas com perfil de curvatura côncavo (75%);
- 2) Áreas residenciais e de favelas (67,7%);
- 3) A litologia ser biotita gnaiss ou gnaiss bandado (58,8%);
- 4) Estar dentro de um raio de 100m do lineamento mais próximo (47,1%);

Sobre a natureza do movimento e o tipo de material mobilizado, é razoável dizer que a maioria dos eventos será de escorregamentos translacionais (>17,8%) mobilizando pequenos volumes (58%) de solo residual de mais de 2m de perfil (79,4%). A maioria das quedas (7,4% do total) será em gnaisses (80%). Quanto à magnitude dos eventos espera-se que aqueles de maior porte ocorram dentro de um raio de 100m do lineamento mais próximo (75%), em favelas ou áreas residenciais (75%) e

sobre gnaisses (75%). Já a respeito dos fatores deflagradores, pôde-se concluir que são diversos e a relação que mantêm entre si é diferente para cada lugar. Isto justifica esforços continuados de pesquisa na compartimentalização da área em domínios geológico-geotécnico-geomorfológicos nos quais as variáveis ambientais atuem de forma semelhante, de forma a aumentar a compreensão dos mecanismos naturais e a previsibilidade dos eventos a nível local.

7 Considerações Finais

Após todos os resultados anteriormente obtidos, pode-se traçar diversas conclusões, de diversos níveis, desde mais diretas até mais complexas, que suscitam novas perguntas e alimentam novas hipóteses. Pôde-se perceber que a questão problematizada neste trabalho envolve variáveis difíceis de medir e nem sempre quantificáveis, cujas inter-relações são complexas e dinâmicas. Embora seja possível identificar algumas associações-chave de atributos preferenciais para a ocorrência de escorregamentos, ainda não é possível entender todas as possíveis inter-relações de variáveis em sua complexidade. Desta forma, longo é o caminho a ser percorrido antes que seja possível fazer predições precisas a respeito de quando, onde e de que forma ocorrerão os escorregamentos. Ter uma boa base de dados que contemple um grande número de variáveis durante muitos anos é essencial, informações estas ainda muito incipientes na área de estudo. Com o passar dos anos e o aumento da ocupação humana da área do maciço, haverá mais ocorrências e mais importante será a precisão dos sistemas de alerta. É essencial que estes sistemas de alerta contemplem em seus modelos de risco a heterogeneidade que existe na área de estudo, possuindo níveis diferentes de risco associados a cada domínio geológico-geotécnico-geomorfológico. Este trabalho é um pequeno passo dentro de um esforço muito maior para a compreensão destes fenômenos, a conservação dos ambientes naturais e a proteção da vida humana.

Referências

- ALEXAKIS, D. D.; AGAPIOU, A.; TZOUVARAS, M.; THEMISTOCLEOUS, K.; NEOCLEOUS, K.; MICHAELIDES, S. Integrated use of GIS and remote sensing for monitoring landslides in transportation pavements: the case study of Paphos area in Cyprus. *Natural Hazards*, Springer Science+Business Media, Dordrecht, n. 72, p. 119 – 141, July 2014.
- ANDRADES FILHO, C. de O.; FONSECA, L. Lineamentos estruturais a partir de imagem Landsat TM e dados SRTM. In: ANAIS XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal, Brasil. Natal, Brasil, 2009. p. 3151 – 3158.
- COSTA FILHO, L. M.; DECAMPOS, T. M. P. Anisotropy of a Gneissic Residual Soil. In: IX PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1991, Vina del Mar. Vina del Mar: Sociedad Chilena de Geotecnia, 1991. v. 1, p. 51 – 61.
- COSTA, V. C. da. *Propostas de Manejo e Planejamento Ambiental de Trilhas Ecoturísticas: Um Estudo no Maciço da Pedra Branca – Município do Rio de Janeiro (RJ)*. 2006. 381 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Geografia) — UFRJ, Rio de Janeiro.
- CPRM; UERJ. *Geologia e Recursos Minerais da Folha Baía de Guanabara: SF-23-Z-B-IV*. Belo Horizonte, 2012.
- CRUDEN, D. M. Une Définition Simple d'un Glissement de Terrain. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Paris, n. 43, p. 27 – 29, April 1991.
- DAS, I.; STEIN, A. Application of the Multitype Strauss Point Model for Characterizing the Spatial Distribution of Landslides. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, Cairo, v. 2016, p. 1 – 12, April 2016.
- DEFESA CIVIL E SECRETARIA DE ORDEM PÚBLICA. Plano de Contingência. Rio de Janeiro, p. 1 – 39, 2013. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/defesacivil/plano-de-contingencia>>. Acesso em: 18/01/2018.
- DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S. de; MACHADO, C. O. Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 1, p. 24 – 38, Março 2009.
- DING, M.; HU, K. Susceptibility mapping of landslides in Beichuan County using cluster and MLC methods. *Natural Hazards*, Springer Science+Business Media, Dordrecht, n. 70, p. 755 – 766, August 2014.
- D'ORSI et al. Análise dos Escorregamentos em Encostas do Município do Rio de Janeiro Deflagrados por Chuvas Intensas no Ano de 2010. *VI Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas*, Angra dos Reis, p. 453 – 460, 2013.
- D'ORSI et al. *Relatório de Correlação entre Chuvas e Escorregamentos para a Cidade do Rio de Janeiro no ano de 2010*. Rio de Janeiro, 2012.

Fundação Geo-Rio. *Manual Técnico de Encostas*: Volume 1. Rio de Janeiro, 2014. 518 p.

FUTAI, M. M.; CECÍLIO JR., M. O.; ABRAMENTO, M. Resistência ao Cisalhamento e Deformabilidade de Solos Residuais da Região Metropolitana de São Paulo. In: _____. *Twin Cities – Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba*. 1. ed. São Paulo: ABMS, 2012. cap. 7.

HUNGR, O.; LEROUÉIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, Springer, Heidelberg, n. 11, p. 167 – 194, 2014.

INEA, I. E. do M. A. . *Parque Estadual da Pedra Branca*. 2018. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/Portal/Agendas/BIODIVERSIDADEEAREASPROTEGIDAS/UnidadesdeConservacao/INEA_008594%23/Sobreoparque>. Acesso em: 28/01/2018.

Tominaga, L.K; Santoro, J.; Amaral, R. (Ed.). *Desastres Naturais: Conhecer para Prevenir*. 1. ed. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2009. ISBN 978-85-87235-09-1.

LIU, C. et al. Susceptibility evaluation and mapping of China's landslides based on multi-source data. *Natural Hazards*, Springer Science+Business Media, Dordrecht, n. 69, p. 1477 – 1495, June 2013.

MACCARINI, M. *Ensaio Triaxiais e de Cisalhamento Direto no Solo Residual Gnáissico Jovem do Campo Experimental da PUC-Rio, Gávea*. 1980. 254 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) — PUC-Rio, Rio de Janeiro.

MACIEL, I. C. Q. *Aspectos Microestruturais e Propriedades Geomecânicas de um Perfil de Solo Residual de Gnaisse Facoidal*. 1991. 183 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) — PUC-Rio, Rio de Janeiro.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, Linear, Lineation: some proposed new standards for old terms. *GSA Bulletin*, v. 87, p. 1463 – 1469, 1976.

PARIZZI, M. G. et al. Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. *Geografias*, IGC/UFGM, Belo Horizonte, n. 11, p. 49 – 69, junho-dezembro 2010. Disponível em: <<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geografias/article/view/514>>. Acesso em: 19/01/2018.

PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS, PMA:GCA. Movimientos en Masa en la Región andina: Una guía para la evaluación de amenazas. n. 4, p. 1 – 432, Noviembre 2007. ISSN 0717-3733.

R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2008. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 02/12/2017.

SIDLE, R.; BOGAARD, T. A. Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides. *Earth-Science Reviews*, Elsevier, n. 159, p. 275 – 291, June 2016. ISSN 0012-8252.

- SOETERS, R.; VANWESTEN, C. Landslides: Investigation and Mitigation. In: _____. *Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1996. (Transportation Research Board Special Report 247), cap. 8, p. 129 – 177. ISBN 0309061512.
- TERZAGHI, K. Mechanisms of Landslides. In: _____. *Application of Geology in Engineering Practice*. Berkeley: Geotechnical Society of America, 1950. p. 83 – 125.
- TUPINAMBÁ, M. GEOLOGIA DA FAIXA RIBEIRA SETENTRIONAL: ESTADO DA ARTE E CONEXÕES COM A FAIXA ARAÇUAÍ. *Geonomos*, Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa, Belo Horizonte, v. 15, n. 1, p. 67 – 79, 2007. ISSN 24466964.
- VARNES D.J. Landslides Types and Processes. In: _____. *Landslides and Engineering Practice*. Eckel, e.b. ed. Washington: Highway Research Board, 1958. v. 29, cap. 3, p. 20 – 47.
- VARNES D.J. Slope Movement Types and Processes. In: _____. *Landslides: Analysis and control*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1978. (Transportation and Road Research Board Special Report 176), cap. 2, p. 11 – 33.
- WANG, W. et al. A subjective and objective integrated weighting method for landslides susceptibility mapping based on GIS. *Environment Earth Sciences*, Springer, p. 1705 – 1714, 2012.
- WU, W.; SIDLE, R.C. A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins. *Water Resources Research*, American Geophysical Union, v. 31, n. 8, p. 2097 – 2110, August 1995.
- XU, C.; XU, X. Statistical analysis of landslides caused by the Mw 6.9 Yushu, China, earthquake of April 14, 2010. *Natural Hazards*, Springer Science+Business Media, Dordrecht, n. 72, p. 871 – 893, January 2014.